

**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID  
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**



**TRABAJO DE FIN DE GRADO**  
**GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA**

**ESTIMACIÓN DE LA MÁXIMA APORTACIÓN EÓLICA**  
**AL CONSUMO ELÉCTRICO EN ESPAÑA**

**AUTOR:** Elena Pérez García

**TUTOR:** Víctor Tribaldos Macías



***ESTIMACIÓN DE LA MÁXIMA APORTACIÓN EÓLICA AL CONSUMO ELÉCTRICO  
EN ESPAÑA***



# ***AGRADECIMIENTOS***

Estas líneas están dedicadas a todos aquellos que me han ayudado a la hora de realizar este proyecto, y a la vez, a todos aquellos que me han estado apoyando a lo largo de la carrera, la cual finaliza con este trabajo.

La primera persona que me viene a la mente si tengo que dar las gracias, es mi padre. No hay palabras para describir todo lo que ha hecho por mí durante estos años. Por ti papá, soy ingeniera.

A mis amigos de la carrera, hay que estudiar ingeniería para entender por lo que pasamos estos años. A Sergio, mi parcerero, por estar conmigo más horas que nadie y por hacer todo lo posible para que siempre tuviese una sonrisa en la cara. Contigo me faltan las palabras, he ganado un hermano. A Julia, desde el primer día hasta el último día juntas. No me hubiese imaginado estar estos años sin ti. Tú peleas mis luchas, y yo pelearé las tuyas. A Álex, y a sus conversaciones por teléfono de hora y media. Porque nadie como él ha sufrido mis dispensas. Te has ganado un sitio en mi corazón, hermano. A Ángel, porque da los mejores consejos en toda la universidad. Has sido todo un ejemplo para mí. Mención especial a Fernando en este proyecto, que sin su ayuda, hubiese estado mucho más tiempo peleándome con Matlab, Atkin te lo agradece también. Y a todos los que habéis estado conmigo a lo largo de este tiempo. Os quiero.

A mis amigos de toda la vida, que son los que más han sufrido mis encierros en casa y mis agobios en exceso. Sois unos santos por aguantarme. Mil gracias por vuestra paciencia y vuestro apoyo, habéis sido fundamentales en mi vida. Siempre sabíais qué decir para animarme. Sois los mejores.

Como no, a Víctor, el mejor tutor que podía tener. Millones de gracias por todo el tiempo que me has dedicado, por ayudarme en todo lo que necesitaba y por enseñarme tantas cosas. Si esto ha salido adelante ha sido gracias a ti.



***ESTIMACIÓN DE LA MÁXIMA APORTACIÓN EÓLICA AL CONSUMO ELÉCTRICO  
EN ESPAÑA***



# ***ABSTRACT***

In Spain more electricity is consumed than generated. This situation leads to a strong dependence on other countries in order to fulfill the electricity demand. The energy resources in Spain are insufficient, nevertheless, regarding wind energy installations, Spain is established as the fifth leading country in the world. Therefore, one could ask: could Spain produce as much electricity as the demand using only wind power technology?

The mission of this project is to answer that question. In order to do that, it has been calculated an estimation of the maximum wind power that could be extracted. Once the study has been realized, it has been concluded that **279 GW** of wind power could be extracted. So we could install so much power than the theoretical 23 GW that are already installed. However, taking into account the Spanish electricity needs, it would be enough to install **103 GW** to supply the Spanish electricity demand.

The initial investment of this project would be **126690 million euro**. Although it seems to be a huge payout, the pay-back period is only **9 years**, achieving an 20-year project IRR of **9.4%**.

In conclusion, Spain could become energetically self-sufficient by using only wind energy.



***ESTIMACIÓN DE LA MÁXIMA APORTACIÓN EÓLICA AL CONSUMO ELÉCTRICO  
EN ESPAÑA***



## ***RESUMEN***

En España gastamos más electricidad de la que producimos. Esto conlleva una situación de dependencia energética con respecto a otros países para poder abastecer las necesidades eléctricas. Los recursos energéticos en España son escasos, sin embargo, España se sitúa como el quinto país con más potencia eólica instalada en el mundo. Por ello, cabe preguntarse: ¿podría España generar electricidad suficiente para satisfacer las necesidades usando solo la energía eólica?

La misión de este proyecto es darle respuesta a esa pregunta. Para ello, se ha realizado una estimación de la potencia eólica máxima que se podría extraer por comunidades autónomas. Después de haber realizado dicho estudio, se ha concluido que se podría extraer **279 GW** de potencia eólica, un número mucho mayor a los 23 GW teóricos ya instalados. Sin embargo, atendiendo a las necesidades eléctricas españolas, bastaría con instalar **103 GW** para abastecer la demanda eléctrica española.

La inversión inicial de este proyecto se situaría en **126690 millones de euros**. Aunque parezca un desembolso desmesurado, el período de Pay-back se sitúa en **9 años**, obteniendo una rentabilidad a los 20 años del **9.4%**.

Por lo tanto, España podría llegar a ser energéticamente autosuficiente usando únicamente la energía eólica.



***ESTIMACIÓN DE LA MÁXIMA APORTACIÓN EÓLICA AL CONSUMO ELÉCTRICO  
EN ESPAÑA***





# *ÍNDICE*

<b>1.</b>	<b><i>INTRODUCCIÓN</i></b> .....	<b>11</b>
<b>2.</b>	<b><i>ENERGÍA EÓLICA</i></b> .....	<b>15</b>
	<b>2.1 ENERGÍA EÓLICA EN ESPAÑA</b> .....	<b>15</b>
	<b>2.2 FUNDAMENTOS DE LA ENERGÍA EÓLICA</b> .....	<b>17</b>
	FÍSICA DE LA ENERGÍA EÓLICA .....	18
	AEROGENERADORES .....	21
	CURVA DE POTENCIA DEL AEROGENERADOR .....	24
	DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL .....	25
	ROSA DE LOS VIENTOS .....	26
	<b>2.3 LIMITACIONES DEL ENTORNO FÍSICO</b> .....	<b>27</b>
	GEOGRAFÍA ESPAÑOLA .....	27
<b>3.</b>	<b><i>POTENCIAL EÓLICO EN ESPAÑA</i></b> .....	<b>29</b>
	<b>3.1 ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL EÓLICO TERRESTRE EN ESPAÑA</b> .....	<b>29</b>
	LIMITACIONES .....	33
	RESULTADOS .....	35
	<b>3.2 ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL EÓLICO MARINO EN ESPAÑA</b> .....	<b>36</b>
<b>4.</b>	<b><i>COSTES</i></b> .....	<b>39</b>
<b>5.</b>	<b><i>CONCLUSIONES</i></b> .....	<b>45</b>
	<b><i>ANEXO A</i></b> .....	<b>51</b>



***ESTIMACIÓN DE LA MÁXIMA APORTACIÓN EÓLICA AL CONSUMO ELÉCTRICO  
EN ESPAÑA***



# ***1. INTRODUCCIÓN***

España es un país con escasez en recursos energéticos tradicionales. Hay una carencia en hidrocarburos, y el carbón disponible no es de buena calidad. Debido a este motivo, el país se ha visto en una situación de dependencia con otros países para importar recursos energéticos. El grado de autoabastecimiento de energía primaria en 2015 fue del 27%. [1]

El consumo de energía primaria en España en 2015 fue de 123868 Ktep (kilo toneladas equivalentes de petróleo). La principal fuente de energía primaria ha sido el petróleo, con casi el 45 %, mientras que las energías renovables han cubierto el 13 % de la energía consumida. La producción nacional de energía en 2015 fue de 33306 Ktep, siendo la energía nuclear la mayor fuente de producción energética. [1]

Debido a este déficit energético, se plantean distintas alternativas a la situación actual para aprovechar al máximo los recursos energéticos disponibles.

Una de las fuentes energéticas más activas a lo largo del año, asegurando así el abastecimiento eléctrico, es la energía nuclear [2]. 32,3 kilogramos de uranio tienen la energía equivalente de 100000 toneladas de carbón. Sin embargo, debido a la moratoria nuclear en España, el desarrollo de esta fuente de energía está suspendido temporalmente. Dicha moratoria finalizó en 1997, pero la construcción de nuevas centrales nucleares requiere una aprobación del Gobierno, por lo que dicho desarrollo depende de decisiones políticas. [3]

Otra de las posibles opciones sería seguir aprovechando los combustibles fósiles, pero con variantes de los tradicionales métodos de extracción. Un ejemplo es el fracking. La



fractura hidráulica es un método de extracción de hidrocarburos atrapados en rocas de baja permeabilidad, a una profundidad mayor de 3000 metros. Dicha extracción se realiza mediante una perforación e introducción de un tubo metálico recubierto de cemento. Posteriormente se inyecta agua a presión, arena y sustancias químicas para agrietar la roca y permitir la salida del gas acumulado. [4]

Sin embargo hay numerosos riesgos al realizar esta práctica, tanto para el medioambiente, como para la salud de las personas. [5] Algunos de estos riesgos son el aumento de probabilidad de terremotos, la contaminación atmosférica por escapes de gases o la contaminación de acuíferos por escapes de sustancias químicas.

Una de las alternativas más atractivas a estas propuestas es el incremento de uso de energías renovables.

Un mayor uso de energías renovables garantizaría un suministro energético autóctono y seguro. A su vez, reduciría las emisiones altamente contaminantes que producen los combustibles fósiles.

Debido a su localización geográfica, España es uno de los países europeos con mayor irradiación solar en Europa. Por ello, es uno de los países en los que el aprovechamiento de la energía solar es más interesante. Es posible aprovechar esa energía solar que se recibe mediante placas solares. Sin embargo, según la Comisión Europea, China controla el 80% del mercado de paneles solares en Europa [6] debido a que el precio de los paneles solares chinos es muy inferior al de los españoles. Por este motivo no resulta una alternativa atractiva, ya que en vez de importar electricidad, se acaban importando paneles solares.

Dentro de las energías renovables en España, destaca la importancia de la energía eólica. Durante los últimos años, se ha podido observar un gran crecimiento en su desarrollo en España, convirtiéndose en la actualidad en el quinto país del mundo que más potencia eólica tiene instalada. [7]

Según la Red Eléctrica de España, en 2015 la potencia eólica instalada era de **23020 MW**. [8]

Entre las múltiples ventajas que tiene la energía eólica cabe destacar su baja contaminación, su seguridad, y la naturaleza de su fuente de recursos, que es inagotable.

Sin embargo, hay ciertas desventajas como la baja densidad de energía. Esto se traduce en la necesidad de instalar un gran número de aerogeneradores para obtener una cantidad significativa de energía. De esta forma, es necesaria una gran extensión de terreno para instalar los aerogeneradores.



Debido a que no se puede controlar la velocidad del viento, otra de las desventajas es la intermitencia.

Todo ello implica que a la hora de instalar aerogeneradores en ciertas zonas, haya que tener en cuenta unas condiciones físico-tecnológicas.

En un intento de aprovechar al máximo los recursos que ofrece la geografía española, este proyecto tiene como objetivo estimar la máxima aportación de energía eólica considerando todas las limitaciones existentes. Conocida la máxima aportación eólica, es posible a su vez, analizar qué porcentaje de las necesidades energéticas en España sería capaz de cubrir sólo la energía eólica.

Lo primero a tener en cuenta será el área de terreno válido para la instalación de los aerogeneradores. Con esta información será posible estimar un número aproximado de toda la potencia eólica que se podría instalar en España y su contribución a las necesidades energéticas del país.

La presente memoria se ha estructurado según una serie de capítulos para facilitar la lectura, desarrollando los conceptos para la realización de este proyecto. En el capítulo 2 se introducirán los conceptos básicos, físicos y tecnológicos, de la energía eólica que serán necesarios para el desarrollo del proyecto. El capítulo 3 se realizará los cálculos necesarios para estimar el potencial eólico en España. Primero se hará una estimación global, y posteriormente se analizará más en detalle por comunidades autónomas. Dicho estudio se hará primero con la energía eólica terrestre y después con la energía eólica marina. En el capítulo 4 se hará un estudio económico, considerando todos los costes necesarios para llevar a cabo el proyecto y analizando su rentabilidad. Por último, en el capítulo 5 se discutirán los resultados obtenidos en los anteriores capítulos, obteniendo las conclusiones finales.



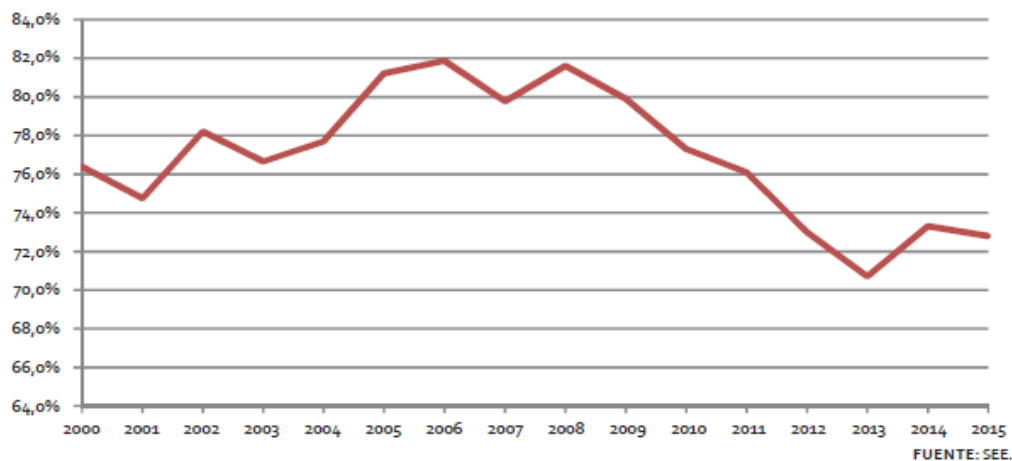
***ESTIMACIÓN DE LA MÁXIMA APORTACIÓN EÓLICA AL CONSUMO ELÉCTRICO  
EN ESPAÑA***



## ***2. ENERGÍA EÓLICA***

### ***2.1 ENERGÍA EÓLICA EN ESPAÑA***

En los últimos años España ha visto reducido su grado de dependencia energética de forma notable. Sin embargo, esta dependencia sigue siendo considerable, por lo que es necesario intentar reducirla lo máximo posible.



**Figura 1. Gráfico sobre la evolución de la dependencia energética en España [1]**

Como se puede observar en la figura 1, hay un descenso considerable en el grado de dependencia entre los años 2008 y 2013. En ese período de tiempo, el gobierno concedió subvenciones a la instalación de energías renovables en España. Razón por la cual aumentó la instalación de aerogeneradores y como consecuencia, disminuyó la



## ESTIMACIÓN DE LA MÁXIMA APORTACIÓN EÓLICA AL CONSUMO ELÉCTRICO EN ESPAÑA

dependencia energética. Según el **Real Decreto 1/2012** [9] dichas subvenciones fueron suprimidas.

Según los datos del Ministerio de Energía y Turismo [1], en 2015 la principal fuente de producción de energía fue la nuclear, mientras que el mayor consumo de energía provenía de combustibles fósiles. El desglose de consumo y producción de energía se puede ver en detalle en las figuras 2 y 3.

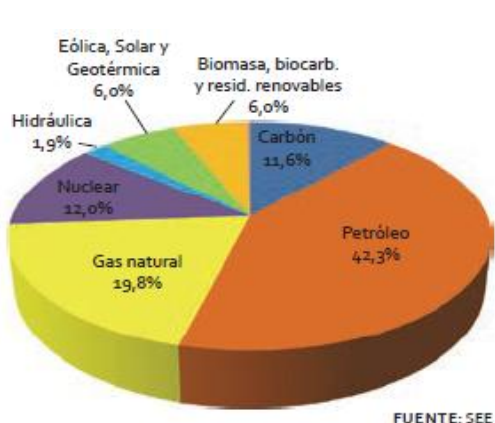


Figura 2. Consumo de energía primaria en 2015 en España [1]

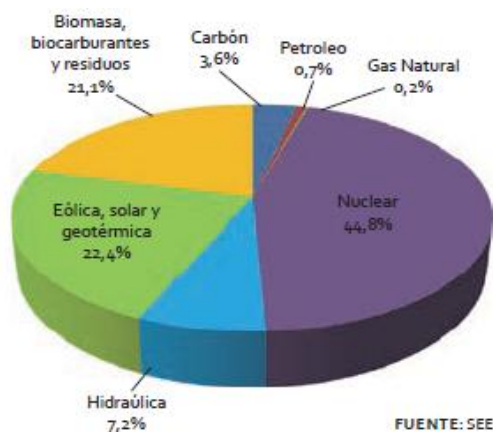


Figura 3. Producción interior de energía primaria en 2015 en España [1]

Como se puede observar en la Figura 3, las fuentes de energía renovables son la segunda mayor fuente de producción de energía en España.

Según los datos proporcionados por la Red Eléctrica de España, en 2015 la demanda de energía eléctrica en España fue de **262931 GWh**, mientras que la potencia eólica instalada fue de **23020 MW**. [8]

Hay que tener en cuenta que la potencia eólica instalada es la máxima teórica que se podría extraer.

Esta potencia instalada pudo cubrir el 18,3% de la demanda energética total española. Es interesante, por lo tanto, analizar cuánto se podría aumentar dicho porcentaje. Los datos descritos previamente sobre la demanda energética y la potencia instalada se pueden ver en detalle en las figuras 4 y 5 respectivamente.





## ESTIMACIÓN DE LA MÁXIMA APORTACIÓN EÓLICA AL CONSUMO ELÉCTRICO EN ESPAÑA

	Sistema peninsular		Sistemas no peninsulares		Total nacional	
	GWh	% 15/14	GWh	% 15/14	GWh	% 15/14
Hidráulica	30.815	-27,5	4	3,1	30.819	-27,5
Nuclear	54.755	-0,2	-	-	54.755	-0,2
Carbón	50.924	23,8	1.865	-14,7	52.789	21,9
Fuel/gas (2)	0	-	6.497	3,8	6.497	3,8
Ciclo combinado (3)	25.334	18,7	4.022	7,6	29.357	17,1
Hidroeléctrica	-	-	9	-	9	-
Eólica	47.707	-5,8	402	1,6	48.109	-5,7
Solar fotovoltaica	7.839	0,5	398	-1,9	8.236	0,3
Solar térmica	5.085	2,5	-	-	5.085	2,5
Otras renovables (4) (5)	4.615	-2,2	10	-6,7	4.625	-2,2
Cogeneración (5)	25.076	-2,0	32	-89,1	25.108	-3,0
Residuos (6)	1.886	-	311	-	2.196	-
<b>Generación</b>	<b>254.036</b>	<b>0,2</b>	<b>13.548</b>	<b>2,0</b>	<b>267.584</b>	<b>0,3</b>
Consumos en bombeo	-4.520	-15,2	-	-	-4.520	-15,2
Enlace Península-Baleares (7)	-1.336	2,9	1.336	2,9	0	-
Saldo intercambios internacionales (8)	-133	-96,1	-	-	-133	-96,1
<b>Demanda (b.c.)</b>	<b>248.047</b>	<b>1,8</b>	<b>14.884</b>	<b>2,0</b>	<b>262.931</b>	<b>1,9</b>

Figura 4. Balance de energía eléctrica nacional en 2015 [8]

	Sistema peninsular		Sistemas no peninsulares		Total nacional	
	MW	% 15/14	MW	% 15/14	MW	% 15/14
Hidráulica	20.352	4,6	1	0,0	20.353	4,6
Nuclear	7.573	0,0	-	-	7.573	0,0
Carbón	10.468	0,0	468	0,0	10.936	0,0
Fuel/gas	0	-100,0	2.490	0,0	2.490	-16,9
Ciclo combinado	24.948	0,0	1.722	0,0	26.670	0,0
Hidroeléctrica	-	-	11	0,0	11	0,0
Eólica	22.864	0,0	156	0,0	23.020	0,0
Solar fotovoltaica	4.420	0,4	244	0,3	4.664	0,4
Solar térmica	2.300	0,0	-	-	2.300	0,0
Otras renovables (1) (2)	742	-24,5	5	0,0	747	-24,4
Cogeneración (2)	6.684	-5,2	44	-63,6	6.728	-6,2
Residuos (3)	677	-	77	-	754	-
<b>Total</b>	<b>101.027</b>	<b>0,5</b>	<b>5.220</b>	<b>0,0</b>	<b>106.247</b>	<b>0,5</b>

Figura 5. Potencia instalada nacional en 2015 [8]

## 2.2 FUNDAMENTOS DE LA ENERGÍA EÓLICA

La energía eólica se obtiene a partir de la energía cinética de las corrientes de aire. Las corrientes de aire son generadas gracias a la radiación solar. El sol emite una radiación que llega de forma desigual a la superficie terrestre. Esta desigualdad genera diferencias de temperatura y presión en la atmósfera que las corrientes de aire intentan equilibrar.



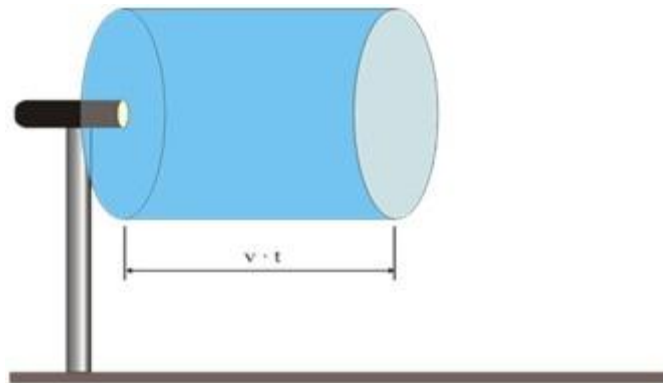
Los aerogeneradores aprovechan la energía cinética del viento para transformarla en energía eléctrica.

### *FÍSICA DE LA ENERGÍA EÓLICA*

Los aerogeneradores convierten la energía cinética del aire que atraviesa sus aspas en energía eléctrica gracias a la ley de Faraday. Por lo tanto, para calcular la máxima cantidad de energía que es posible extraer de los aerogeneradores, es necesario calcular la energía cinética contenida en la masa de aire en movimiento mediante la conocida ecuación (1).

$$E_{cinética} = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

En la figura 5 se representa la masa de aire que atraviesa el área barrida por las palas del aerogenerador.



**Figura 5. Masa de aire que llega al aerogenerador.**

La masa viene dada por la cantidad de aire que atraviesa las palas del aerogenerador en un tiempo  $t$ , y es aquella contenida en un cilindro imaginario cuyo radio es la longitud de las palas y cuya longitud es igual a la distancia recorrida por el aire en ese tiempo, siendo esta distancia  $v \cdot t$ , véase la figura 5. Por lo tanto la masa queda definida según la ecuación (2)

$$m = \rho \cdot Vol = \rho \cdot A \cdot v \cdot t \quad (2)$$

Por lo tanto, la potencia máxima que sería posible extraer vendría dada por:

$$P = \frac{E_{cinética}}{t} = \frac{1}{2}\rho A v^3 \quad (3)$$



Como se observa en la ecuación 3, la potencia es proporcional a la velocidad del aire elevada al cubo,  $v^3$ . Lamentablemente, pese a ser el factor más influyente para determinar la generación instantánea de potencia, es una variable que no podemos controlar, ya que sólo depende de la meteorología.

La potencia también es directamente proporcional al área barrida por las aspas del aerogenerador,  $A$ . Esta variable depende por lo tanto del tamaño del aerogenerador; cuanto mayor sean las aspas de aerogenerador, mayor potencia producirá. Por ello, esta variable sí que la podemos modificar dependiendo del aerogenerador que seleccionemos para su instalación.

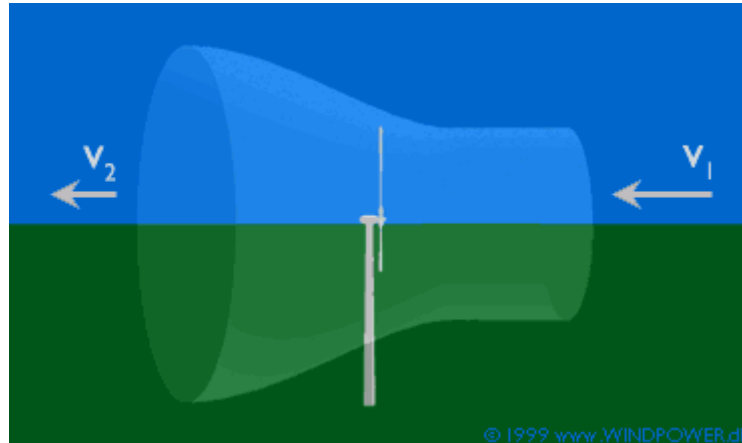
Finalmente, aparece en la ecuación 3 la densidad del aire,  $\rho$ . Esta variable se considera constante, de valor  $1.225 \text{ kg/m}^3$  para el caso del aire, que es el fluido que interviene en la generación de potencia eólica. La ecuación 3 es aplicable para el caso de las turbinas de las presas hidroeléctricas o las plantas mareomotrices, cambiando únicamente el valor de la densidad, siendo ésta ahora la del agua. Por lo tanto, al operar con fluidos más densos, se obtendría una mayor potencia.

Esta potencia eólica no se llega a aprovechar nunca al 100%. Un rendimiento del 100% implicaría que el viento se detuviese tras las aspas del aerogenerador. Para analizar qué porcentaje de potencia eólica se convierte en energía eléctrica se usa el coeficiente de potencia.

$$C_{potencia} = \frac{P_{extraída}}{\frac{1}{2}\rho A v^3} \quad (4)$$

El coeficiente de potencia se define como la relación entre la potencia extraída y la disponible. Es la fracción de la energía cinética del viento convertida en energía cinética de rotación en el rotor del aerogenerador.

Existe un límite superior para la potencia eólica extraída, según el cual ningún aerogenerador puede extraer del viento una potencia superior a la fijada por este límite. Este límite se define por la Teoría de Betz, que se plantea brevemente a continuación.



**Figura 6. Flujo de aire que atraviesa el aerogenerador.**

Consideremos que la velocidad media del viento a través del área del rotor es el promedio de la velocidad del viento sin perturbar antes de llegar a la turbina eólica,  $v_1$ , y la velocidad del viento después de su paso por el rotor,  $v_2$ , como se observa en la figura 6. Por lo tanto la velocidad queda definida según la ecuación 5.

$$v = \frac{1}{2} \cdot (v_1 + v_2) \quad (5)$$

La masa de aire que circula a través del rotor en un segundo, partiendo de la ecuación 2, es:

$$m = \rho \cdot A \cdot v \quad (6)$$

Partiendo de la segunda ley de Newton, la fuerza que ejerce el fluido sobre el rotor es:

$$F = m \cdot a = m \cdot \frac{\Delta v}{t} \quad (7)$$

La fuerza que ejerce el fluido en el rotor en un segundo ( $t=1$  segundo), se obtiene sustituyendo en la ecuación 7, las ecuaciones 5 y 6:

$$F = \rho \cdot A \cdot \frac{1}{2} \cdot (v_1 + v_2) \cdot (v_1 - v_2) \quad (8)$$

Siendo la potencia instantánea igual al producto de la fuerza por la velocidad, la potencia extraída por el aerogenerador será:

$$P = \rho \cdot A \cdot \frac{1}{2} \cdot (v_1 + v_2) \cdot \frac{1}{2} \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (9)$$

La velocidad  $v_1$  queda definida por las condiciones meteorológicas, por lo tanto, es deseable que el valor de  $v_2$  maximice el gasto másico de aire que pasa por el rotor, y que a su vez minimice las pérdidas debidas a la energía cinética.



Para calcular el máximo valor de  $v_2$ , se define el parámetro  $k = \frac{v_2}{v_1}$ , y sustituyendo en la ecuación 9 se obtiene:

$$P = \rho \cdot A \cdot \frac{1}{4} \cdot (1 + k) \cdot v_1^3 \cdot (1 - k^2) \quad (10)$$

Derivando la potencia en función de  $k$  e igualando a cero se obtiene la máxima potencia que se puede extraer en función de la relación de velocidades, obteniendo  $\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3}$

Por lo tanto, la máxima potencia extraíble, se obtiene cuando  $v_2 = \frac{1}{3} \cdot v_1$

Sustituyendo dicha relación en la ecuación 9, se obtiene el valor de la máxima potencia extraíble:

$$P = \rho \cdot A \cdot \frac{8}{27} \cdot v_1^3 \quad (11)$$

El límite de Betz se corresponde con el máximo coeficiente de potencia, por lo que, sustituyendo la ecuación 11, en la ecuación 4, se obtiene el valor del límite de Betz:

$$C_{potencia\ máx} = \frac{\rho \cdot A \cdot \frac{8}{27} \cdot v_1^3}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3} = \frac{16}{27} = 0.5925 \quad (12)$$

Por lo que el rendimiento máximo que se podría obtener de un aerogenerador sin pérdidas es del 59.25%.

En el proceso de transformación de energía también hay pérdidas a tener en cuenta, como por ejemplo el rozamientos del viento con las palas, o el rozamiento entre elementos mecánicos del propio aerogenerador. Por lo tanto, al final el rendimiento de un aerogenerador se suele situar en un 50% aproximadamente. Este valor es el que se tomará posteriormente a la hora de realizar los cálculos.

## *AEROGENERADORES*

En la actualidad se usan aerogeneradores de eje horizontal formados por los siguientes componentes:

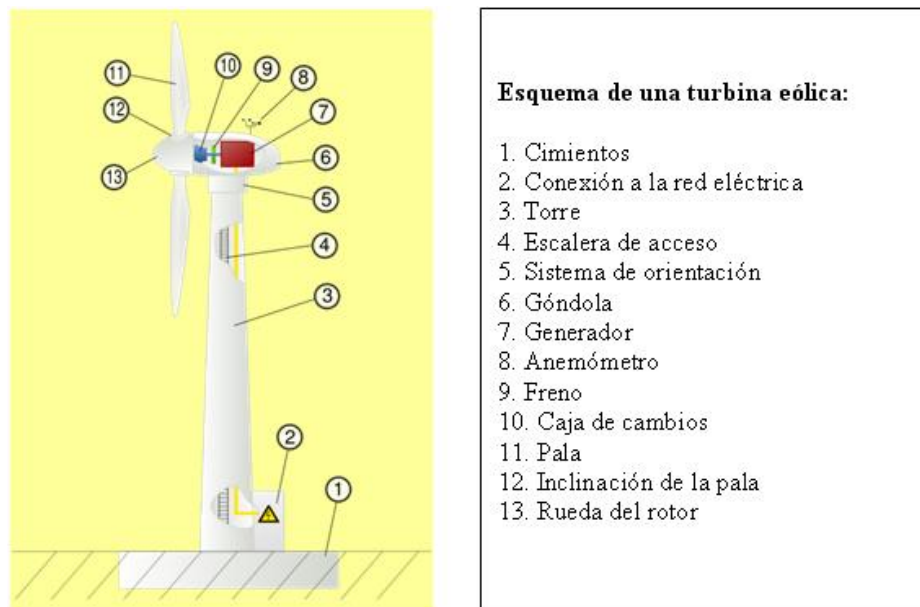
- Cimentación subterránea de hormigón armado



## ESTIMACIÓN DE LA MÁXIMA APORTACIÓN EÓLICA AL CONSUMO ELÉCTRICO EN ESPAÑA

- Torre: levantada sobre la cimentación. Su misión es soportar el peso del aerogenerador y mantenerlo elevado para evitar las bajas velocidades.
- Palas
- Estación meteorológica: permite conocer las condiciones atmosféricas.
- Góndola: pieza en cuyo interior se encuentran los mecanismos eléctricos (generador eléctrico, controles y accionamientos), el tren de potencia (formado por el eje del rotor, la caja multiplicadora, el eje rápido y los acoplamientos flexibles), el sistema de frenado y el sistema de control.
- Mecanismo aerodinámico de orientación: dependiendo de la dirección del viento se orientará en una u otra dirección. Puede ser mediante orientación asistida o por veleta de cola.

Las distintas partes de un aerogenerador se pueden ver en detalle en la figura 7.



**Figura 7. Componentes de un aerogenerador.**

Como se ha comentado previamente, a medida que aumenta el área barrida por los aerogeneradores, más energía se puede obtener. Actualmente, el aerogenerador terrestre más grande instalado es el Enercon E126, del cual se puede obtener hasta 6 MW [10].

Sin embargo, cuanto mayor sea el diámetro de las aspas, mejores materiales serán necesarios para resistir los grandes esfuerzos que sufriría el aerogenerador y por lo tanto, esto conlleva un aumento considerable en los costes.

En la figura 8 se muestra una evolución del tamaño de los aerogeneradores actuales al igual que de la potencia que pueden proporcionar.



## ESTIMACIÓN DE LA MÁXIMA APORTACIÓN EÓLICA AL CONSUMO ELÉCTRICO EN ESPAÑA



Figura 8. Evolución de los aerogeneradores actuales entre 2008-2012. [11]

El modelo de aerogenerador que se ha escogido para realizar todo el proyecto es el Enercon E82, un aerogenerador que genera 2 MW de potencia. En la figura 9 se pueden observar los datos técnicos que se pueden encontrar en el catálogo de aerogeneradores de Enercon [12]

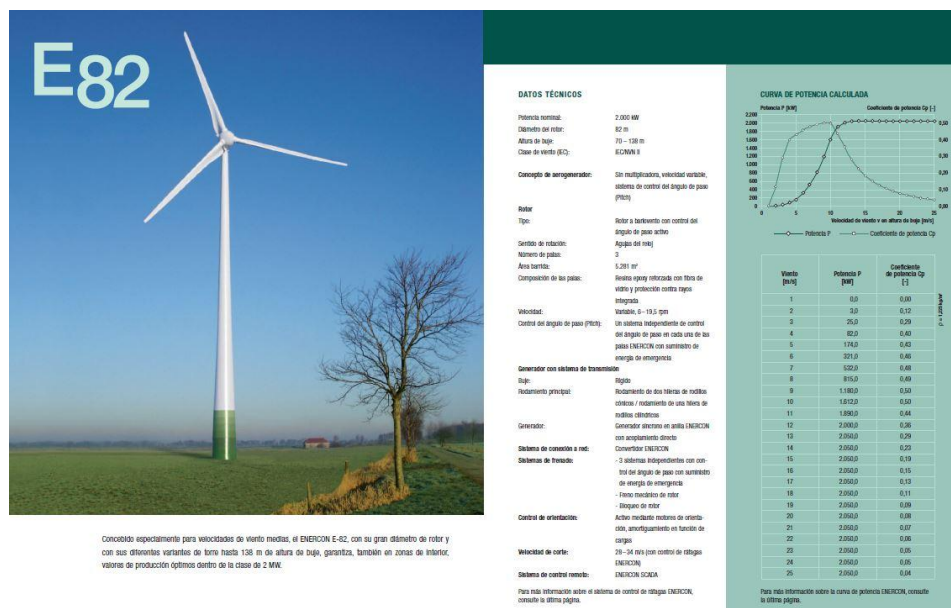


Figura 9. Datos técnicos del aerogenerador Enercon E82. [12]

Se ha decidido usar este aerogenerador ya que los aerogeneradores de 2MW están bastante desarrollados en la actualidad y son los más usados a la hora de instalar parques eólicos. También resultan más económicos que los de mayor potencia, factor a tener en cuenta en el capítulo 4 en el que se estudiarán los costes.



### ***CURVA DE POTENCIA DEL AEROGENERADOR***

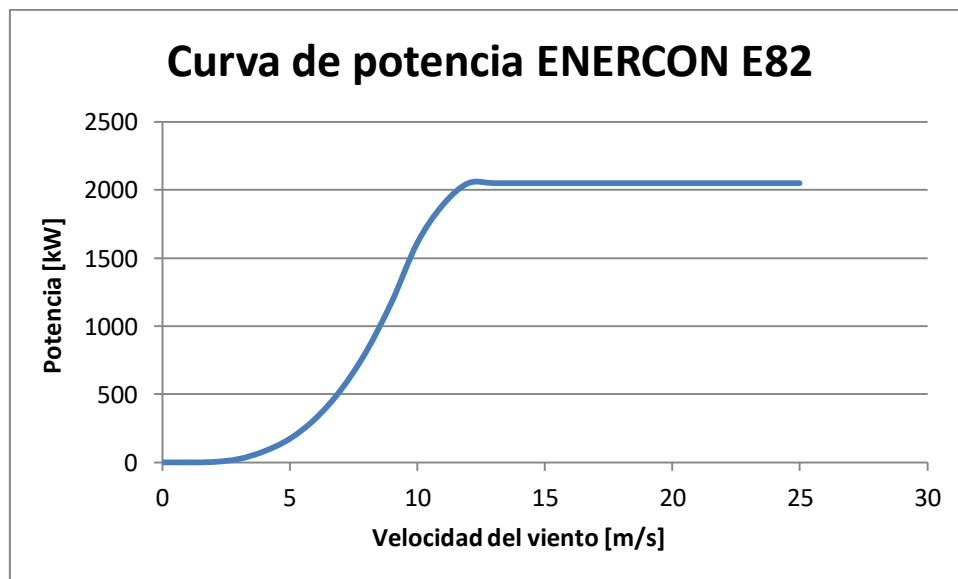
Cada aerogenerador tiene una curva de potencia propia. Esta curva representa la potencia obtenida en función de la velocidad del viento.

Los aerogeneradores empiezan a funcionar a partir de una velocidad de arranque. A esta velocidad, se han superado todos los límites de rozamientos que pudiese sufrir el aerogenerador, sacando así la producción eléctrica. Esta velocidad de arranque se sitúa sobre los 3 m/s.

Una vez alcanzada la velocidad de arranque, la potencia proporcionada por el aerogenerador va aumentando rápidamente hasta alcanzar la velocidad nominal, a partir la cual el aerogenerador proporciona toda la potencia disponible. Este aumento de potencia extraíble es proporcional con la velocidad al cubo como se mostraba en la ecuación 3.

Hay que tener en cuenta también que si el aerogenerador se somete a velocidades de viento demasiado altas, no puede seguir funcionando, por lo que existe una velocidad máxima a la que permite estar funcionando. Esta velocidad límite de funcionamiento se denomina velocidad de parada. Esta limitación es necesaria para evitar que el aerogenerador se dañe por el exceso de rotación que sufriría. Dicha velocidad se suele situar sobre los 25 m/s.

La curva de potencia del Enercon E82 se muestra en la figura 10.



**Figura 10. Curva de potencia del Enercon E-82.**





Como se observa en la figura 8, inicialmente la potencia que proporciona el aerogenerador es nula hasta alcanzar la velocidad de arranque. Una vez alcanzada dicha velocidad, empieza a generar una potencia cada vez mayor. El aumento de potencia es proporcional a  $v^3$ .

Finalmente se obtiene la potencia máxima que puede dar el aerogenerador a altas velocidades hasta alcanzar la velocidad de parada.

En España, la frecuencia de la corriente alterna se sitúa en 50 Hz. Para conseguir esta frecuencia, no es suficiente la velocidad de giro de las palas, por tanto, hay que aumentar la velocidad de giro del eje unido a las palas hasta alcanzar alrededor de 1500 rpm mediante una caja multiplicadora.

### *DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL*

La velocidad el viento es variable a lo largo de todo el año, por lo que es importante poder describir la variación de las velocidades del viento. Se necesita dicha información para optimizar el diseño de los aerogeneradores, y para minimizar los costes de generación eléctrica.

La variación del viento en un emplazamiento se suele describir utilizando la distribución de Weibull.

El conocimiento de esta distribución es importante para estimar la probabilidad de que la velocidad esté comprendida dentro de un intervalo de velocidades dado.

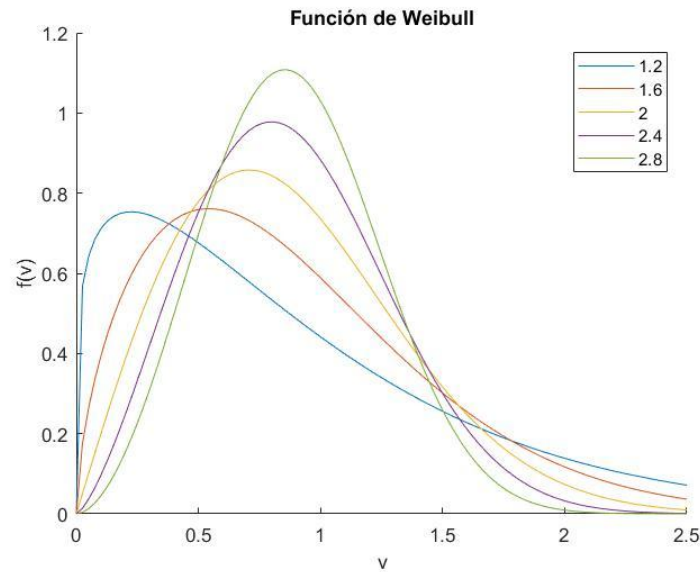
La distribución de Weibull es una función de distribución continua (función densidad de probabilidad) que recopila las distintas velocidades del viento y la frecuencia con la que se ha producido cada una de ellas. Esta función se representa mediante la ecuación (13)

$$f(v) = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (13)$$

De la ecuación 13, se pueden analizar distintos parámetros.

El parámetro  $c$ , expresado en m/s, indica la velocidad media del viento en un emplazamiento, y se denomina parámetro de escala.

El parámetro de forma  $k$ , adimensional, describe el grado de esparcimiento. Como su nombre bien indica, definirá la forma de la distribución. En la figura 11 se muestra un ejemplo de varias distribuciones de Weibull variando únicamente el parámetro de forma.



**Figura 11. Ejemplo de distribuciones de Weibull variando el parámetro de forma.**

Como se observa en la figura 11, los valores del parámetro de forma cercanos a 1, corresponden a distribuciones muy asimétricas, mientras que los valores más elevados corresponden a distribuciones simétricas. Por tanto, este factor representa físicamente la dispersión de los valores de velocidad en torno a la velocidad media.

Por último, aparece en la ecuación 13 la velocidad del viento instantánea,  $v$ . Dicha velocidad es la variable independiente de la ecuación 13.

En el capítulo 3, donde se realizarán los cálculos del potencial eólico según cada comunidad autónoma, se observará que los parámetros  $c$  y  $k$  variarán dependiendo del emplazamiento, variando por lo tanto la curva de Weibull.

## **ROSA DE LOS VIENTOS**

A la hora de instalar los aerogeneradores es necesario estudiar su orientación para obtener el máximo rendimiento. Para ello, se usa la denominada rosa de los vientos.

La rosa de los vientos es un gráfico circular dividido en dieciséis sectores, los cuales indican cada uno de los sentidos que puede llevar el viento. Los datos representados en la rosa de los vientos son obtenidos mediante mediciones meteorológicas sobre la velocidad y dirección del viento.

El viento debe pasar perpendicularmente a través de las aspas del aerogenerador, por ello, la información obtenida gracias a la rosa de los vientos será de mucha utilidad para colocar el aerogenerador, de tal forma que la mayor parte del viento circule perpendicularmente a través de sus aspas.



La rosa de los vientos cambia dependiendo de la zona donde nos encontremos, ya que las condiciones meteorológicas varían.

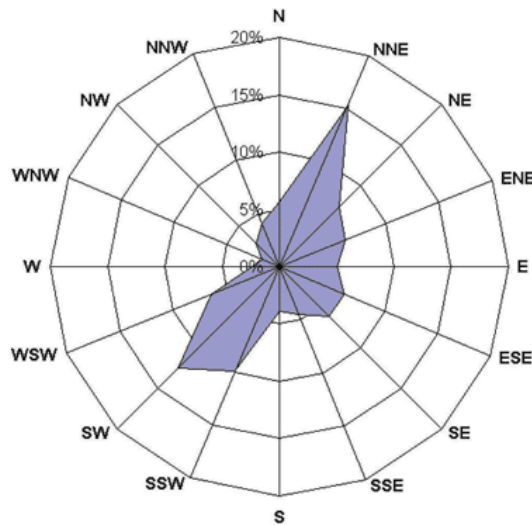


Figura 12. Ejemplo de la rosa de los vientos.

Como muestra la figura 12, la dirección predominante del viento en ese emplazamiento es la nornoreste, por lo que la colocación idónea de los aerogeneradores sería perpendicular a dicha dirección.

## *2.3 LIMITACIONES DEL ENTORNO FÍSICO*

### *GEOGRAFÍA ESPAÑOLA*

El territorio español tiene una superficie total de 505990 km<sup>2</sup>. Sin embargo, no toda la superficie es apta para la instalación de aerogeneradores, hay que tener en cuenta las limitaciones físicas y legislativas existentes.

Gracias a los mapas de viento proporcionados por IDAE [13], es posible visualizar la velocidad media anual del viento en cada zona. Esto permitirá descartar las zonas donde la velocidad del viento sea excesivamente baja.

También habrá que tener en cuenta las zonas urbanas que nos podamos encontrar, las cuales abarcan ciudades y carreteras entre otros. Dichas zonas serán excluidas a la hora de analizar el área disponible para la colocación de aerogeneradores.



Las costas serán un factor importante a analizar para la obtención del potencial eólico marino.

España posee alrededor de 7905 km de costa repartidos entre el litoral peninsular, los archipiélagos de Canarias y Baleares y las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla. [14]

Para estudiar qué parte de la costa será apta para la colocación de aerogeneradores marinos, es necesario estudiar la batimetría de la costa.

La batimetría consiste en la medición de la profundidad de las costas. Por ello, según la profundidad del litoral español, se descartarán las zonas marinas demasiado profundas en las que no sea posible instalar aerogeneradores.



### ***3. POTENCIAL EÓLICO EN ESPAÑA***

#### ***3.1 ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL EÓLICO TERRESTRE EN ESPAÑA***

Inicialmente se pretende hacer una estimación genérica sobre la potencia eólica máxima que se podría obtener en el territorio español. Más adelante se evaluará el área válida según las comunidades autónomas, teniendo en cuenta las limitaciones físicas y legales de cada zona.

Un parámetro fundamental a la hora de analizar el potencial eólico es la densidad de potencia. Dicho parámetro permite cuantificar la cantidad de potencia que se puede generar en una unidad de superficie.

Para estimar la densidad de potencia, hay que definir el área que ocupa un aerogenerador. Este valor queda limitado por la distancia mínima exigida entre aerogeneradores para que no se hagan sombra unos a otros. Si no se colocan los aerogeneradores a una distancia mínima, se produce una interferencia de una turbina sobre la otra, disminuyendo el rendimiento de ésta, y extrayendo, por lo tanto, menos energía.



## ESTIMACIÓN DE LA MÁXIMA APORTACIÓN EÓLICA AL CONSUMO ELÉCTRICO EN ESPAÑA

Queriendo evitar esta disminución del rendimiento, se estiman unas distancias mínimas entre aerogeneradores para aprovechar al máximo su rendimiento. Según el Cuaderno de aplicaciones técnicas nº 12, la separación óptima entre aerogeneradores se sitúa en 8 veces el diámetro del rotor en la dirección del viento y 4 veces el diámetro en la dirección perpendicular al viento. [15]

Habiendo estimado este valor se puede expresar la densidad de potencia mediante la ecuación 14.

$$\frac{P_{aerogenerador}}{A_{aerogenerador}} = \frac{\eta \cdot \frac{1}{2} \rho v^3 \cdot \frac{\pi D^2}{4}}{8D \cdot 4D} = DP \quad (14)$$

La potencia producida por el aerogenerador no es constante, por lo que es necesario estimarla mediante la curva de potencia del aerogenerador seleccionado y la denominada distribución de Weibull.

Como se ha mencionado previamente, la función de Weibull dependerá del emplazamiento que estemos estudiando, por lo que, para estimar una función de Weibull para toda España, es necesario analizar primero varias zonas de distinta situación geográfica y estimar qué parámetros son los más representativos.

En la siguiente imagen se puede observar el mapa eólico de España proporcionado por IDAE donde se representa la velocidad media anual a 80 metros de altura.

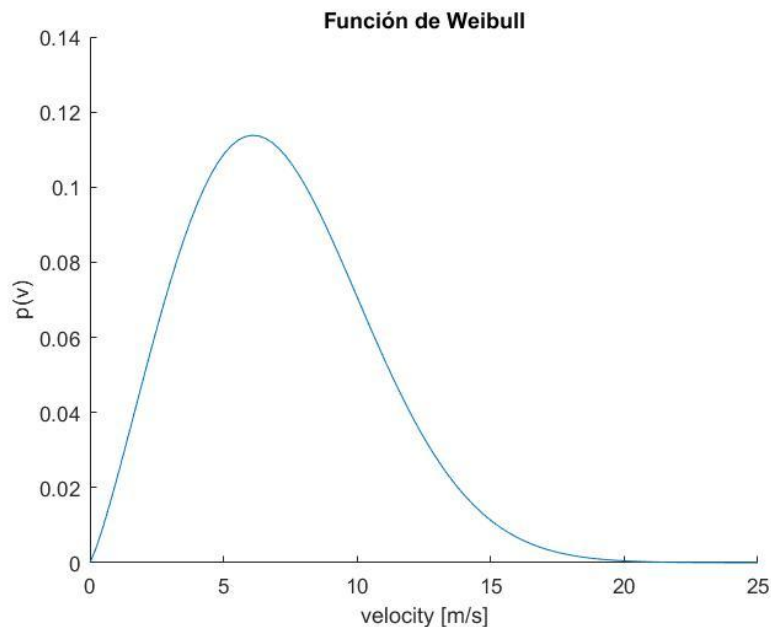


Figura 13. Mapa eólico de España a 80 metros de altura. [13]



Como se observa en la figura 13 las zonas de mayor recurso eólico son el sur de Andalucía, las islas Canarias y Baleares, la zona del valle del Ebro, Galicia, el nordeste de Cataluña y ciertas regiones de Castilla-La Mancha. Una vez obtenidos los resultados de la potencia eólica disponible por comunidades autónomas, se comprobará que coinciden con las zonas de mayor recurso eólico mostradas en la figura 12.

Después de analizar varios emplazamientos en el territorio español gracias a los mapas eólicos proporcionados por IDAE [13], se ha estimado una constante  $k$  con valor de 2.2 y una constante  $c$  de valor 8, para realizar la estimación inicial de toda España. Hay que tener en cuenta que los parámetros  $k$  y  $c$  varían según la zona que estemos analizando, por lo que más adelante se estudiarán las comunidades autónomas por separado, cada una con su respectiva función de Weibull.



**Figura 13. Función de Weibull para la estimación en España.**

Gracias a las especificaciones técnicas proporcionadas por el catálogo de aerogeneradores de Enercon [12], se ha podido representar la curva de potencia del modelo E82 escogido, que se puede observar en la figura 10 del capítulo anterior.

Haciendo uso de la distribución de Weibull y de la curva de potencia del aerogenerador, se obtiene la potencia media que proporciona un aerogenerador instalado en España. Los resultados se muestran en la tabla 1.

Viento [m/s]	Prob (c=8,k=2.2)	Potencia [kW]	Pro x Pot [kW]
0	0	0	0
1	0.0221	0	0



**ESTIMACIÓN DE LA MÁXIMA APORTACIÓN EÓLICA AL CONSUMO ELÉCTRICO  
EN ESPAÑA**

2	0.049	3	0.147
3	0.0746	25	1.865
4	0.0953	82	7.8146
5	0.1087	174	18.9138
6	0.1138	321	36.5298
7	0.1108	532	58.9456
8	0.1012	815	82.478
9	0.087	1180	102.66
10	0.0708	1612	114.1296
11	0.0545	1890	103.005
12	0.0398	2050	81.59
13	0.0275	2050	56.375
14	0.0181	2050	37.105
15	0.0113	2050	23.165
16	0.0067	2050	13.735
17	0.0038	2050	7.79
18	0.002	2050	4.1
19	0.001	2050	2.05
20	0.0005	2050	1.025
21	0.0002	2050	0.41
22	0.0001	2050	0.205
23	0	2050	0
24	0	2050	0
25	0	2050	0
			754.0384

**Tabla 1. Potencia media del aerogenerador Enercon E-82 en España.**

Conociendo el valor de la potencia que proporciona un aerogenerador es posible entonces calcular la densidad de potencia media en España, haciendo uso de la ecuación 14.

$$\frac{P_{aerogenerador}}{A_{aerogenerador}} = \frac{754038.4}{8D \cdot 4D} = 3.68 \text{ W/m}^2$$

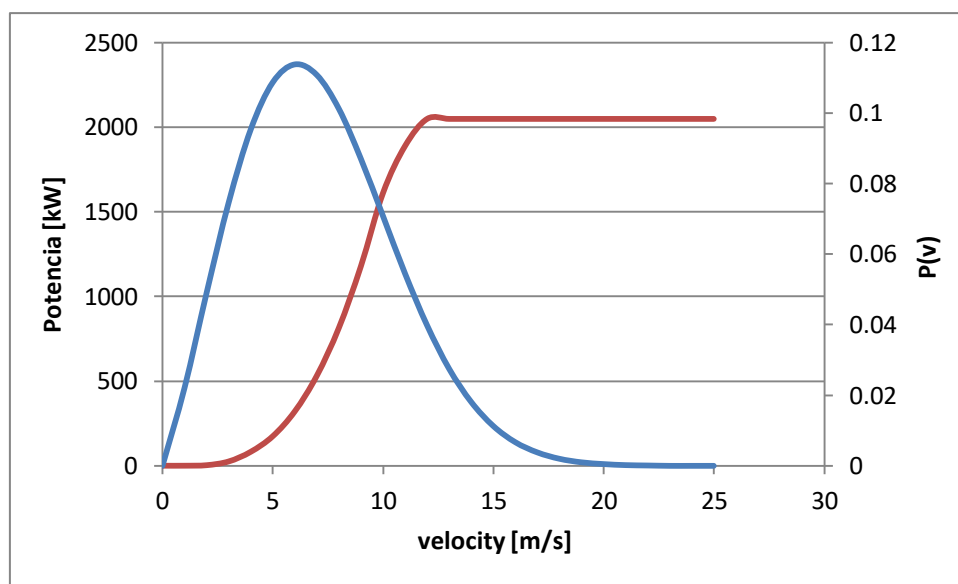




### *LIMITACIONES*

España tiene una superficie total de  $505990 \text{ km}^2$ . Para estimar la superficie en la que es posible instalar los aerogeneradores hay que tener en cuenta las limitaciones que nos podemos encontrar. Entre ellas se encuentran los núcleos urbanos, los espacios naturales protegidos, las carreteras y las zonas donde la velocidad del aire sea insuficiente.

Para analizar mejor el comportamiento de los aerogeneradores seleccionados en las condiciones meteorológicas que se van a encontrar, se ha representado en la figura 14 la curva de potencia del aerogenerador y la curva de distribución de Weibull.



**Figura 14.** Curva del aerogenerador E82 (rojo) y función de Weibull (azul).

Como se observa en la figura 14, el valor medio de la distribución de Weibull se sitúa en 6 m/s, sin embargo, la potencia obtenida por debajo de 6 m/s es muy baja. Por ello, se ha decidido despreciar la potencia que se obtiene por debajo de dicho valor, ya que la potencia aprovechable es prácticamente nula. Como consecuencia, no se tendrá en cuenta las zonas en las que la velocidad del viento sea menor a 6 m/s.

En España, los espacios naturales están protegidos por la **Ley 42/2007** y llegan a abarcar el 7% de todo el territorio español [16].

A su vez, hay que considerar el área urbana que nos encontramos en España, incluyendo aquí las ciudades y carreteras construidas.

Al haber realizado dichas consideraciones por comunidades autónomas, se ha concluido que el área aprovechable de todo el territorio español supone aproximadamente un 20% del área total, quedando un área de  $101198 \text{ km}^2$ .



Todas estas limitaciones se han tenido en cuenta posteriormente en la estimación del potencial eólico por comunidades autónomas, obteniendo un resultado más exacto.

La densidad de potencia estimaba la potencia que se puede obtener por unidad de superficie. Para obtener la potencia que se podría instalar es necesario multiplicar el área disponible por la densidad de potencia.

$$P = DP \cdot \text{Área} = 0.00368 \frac{GW}{km^2} \cdot 191198 km^2 = 372.5 GW$$

Realizando esta operación se obtiene una potencia eólica terrestre en España de 372.5 GW.

Para comprobar con más precisión estas estimaciones se han realizado los cálculos descritos para cada comunidad, sumando posteriormente toda la potencia obtenida.

Gracias a los mapas eólicos proporcionados por el IDAE [13] se ha podido obtener los parámetros de Weibull en cada comunidad autónoma. A su vez, se ha hecho uso del estudio técnico del Atlas eólico de España [17], proporcionado también por IDAE, para la obtención de las áreas disponibles en cada comunidad.

Los resultados se muestran a continuación en la tabla 2. Al final del documento se puede encontrar el Anexo A, en el que se desarrolla en detalle toda la información de interés necesaria para realizar estos cálculos por comunidades autónomas.

En dicho anexo aparecen los mapas eólicos de cada comunidad autónoma proporcionados por IDAE y las correspondientes rosas de los vientos [13]. Gracias a esos mapas se ha podido estimar la superficie de cada comunidad en la que el viento era inferior a 6 m/s. Una vez estimada esa área, se ha analizado qué superficie era válida, suprimiendo aquellas superficies pertenecientes a núcleos urbanos y espacios naturales protegidos, de tal forma que en la tabla 2 aparece una columna con la superficie disponible final.

En el anexo también se podrá observar la función de Weibull que se ha representado para cada comunidad autónoma, y la cual se ha usado para realizar otra tabla (también visible en el Anexo A) en la cual se estima la potencia que se puede extraer de un aerogenerador dependiendo de la comunidad autónoma en la que nos encontremos. Con esa potencia se ha calculado la densidad de potencia de cada comunidad según la ecuación 14. En la tabla 2 aparece una columna con las densidades de potencia de cada comunidad.

Por último, multiplicando la densidad de potencia por el área disponible se obtiene la última columna de la tabla 2 que se corresponde con la potencia eólica extraíble de cada comunidad.



## ESTIMACIÓN DE LA MÁXIMA APORTACIÓN EÓLICA AL CONSUMO ELÉCTRICO EN ESPAÑA

Para obtener la potencia total que se podría extraer en toda España basta con sumar la potencia eólica extraíble de cada comunidad autónoma. Dicho valor aparece al final de la tabla 2.

### RESULTADOS

Comunidad autónoma	Sup Tot [km <sup>2</sup> ]	Sup <6 [km <sup>2</sup> ]	Esp Nat >6 [km <sup>2</sup> ]	Nuc Urb >6 [km <sup>2</sup> ]	Sup Disp [km <sup>2</sup> ]	DP [W/m <sup>2</sup> ]	Pot [GW]
<b>Andalucía</b>	87610	66629	5495	4202	11285	4.3	48.5
<b>Aragón</b>	47730	33116	672	2433	11509	3.2	36.83
<b>Asturias</b>	10611	8175	819	468	1149	3.98	4.57
<b>Cantabria</b>	5319	3806	189	607	717	4.58	3.3
<b>Castilla- La Mancha</b>	79411	62771	929	2060	13651	2.42	33
<b>Castilla y León</b>	94221	77314	1150	2795	12962	3.145	40.77
<b>Cataluña</b>	32204	25528	997	2203	3476	3.068	10.66
<b>Ceuta</b>	19	0	0	13	6	5.83	0.035
<b>Extremadura</b>	41679	34698	439	1167	5375	2.95	15.86
<b>Galicia</b>	29669	15470	1814	2164	10221	4.18	42.72
<b>Islas Baleares</b>	5023	3600	68	836	519	2.62	1.4
<b>Islas Canarias</b>	7450	4596	480	1065	1309	5.41	7.081
<b>La Rioja</b>	5042	3914	86	123	919	3.8	3.5
<b>Madrid</b>	8023	7704	57	72	190	0.916	0.174
<b>Melilla</b>	14	5	0	6	3	4.945	0.015
<b>Murcia</b>	11311	9950	215	479	667	4.686	3.13
<b>Navarra</b>	10384	5437	663	719	3565	1.916	6.83
<b>País Vasco</b>	7230	5798	258	214	960	4.36	4.19
<b>Comunidad Valenciana</b>	23266	20095	198	761	2212	3.556	7.9
<b>TOTAL</b>							270.5

Tabla 2. Potencia obtenida en función de las comunidades autónomas.

Sumando las potencias obtenidas en cada comunidad se obtiene una potencia eólica total extraíble de **270.5 GW**, un valor próximo al estimado previamente.



### *3.2 ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL EÓLICO MARINO EN ESPAÑA*

Una vez calculado el potencial eólico terrestre en España, es necesario analizar el potencial eólico marino del litoral español.

España está formada por la península Ibérica, los archipiélagos de las Baleares y las Canarias y las ciudades costeras de Ceuta y Melilla. Esto significa que una gran parte del país tiene costa, por lo que es interesante analizar el potencial eólico que se puede obtener en dichas zonas.

La energía eólica marina, al igual que la terrestre, aprovecha la velocidad del viento para obtener energía. Esta obtención se hace a través de aerogeneradores que, a diferencia de la energía eólica terrestre, se sitúan mar adentro.

La energía eólica marina permite instalar aerogeneradores de mayor potencia. Esto se debe a la ausencia de obstáculos geológicos en las zonas marinas, consiguiendo mayores velocidades del viento, y más constantes.

Por este motivo, según el estudio técnico del Atlas eólico en España [17], se puede aproximar la densidad de potencia en las costas españolas a un valor de  $6\text{MW/km}^2$ , un valor superior al obtenido en las zonas terrestres.

IDAE pone a la disposición de todo el público un mapa de representación de la zonificación ambiental marina para parques eólicos en España. Dicho mapa se puede ver en la figura 15.



## ESTIMACIÓN DE LA MÁXIMA APORTACIÓN EÓLICA AL CONSUMO ELÉCTRICO EN ESPAÑA

### ZONIFICACIÓN AMBIENTAL MARINA PARA PARQUES EÓLICOS - ESPAÑA -

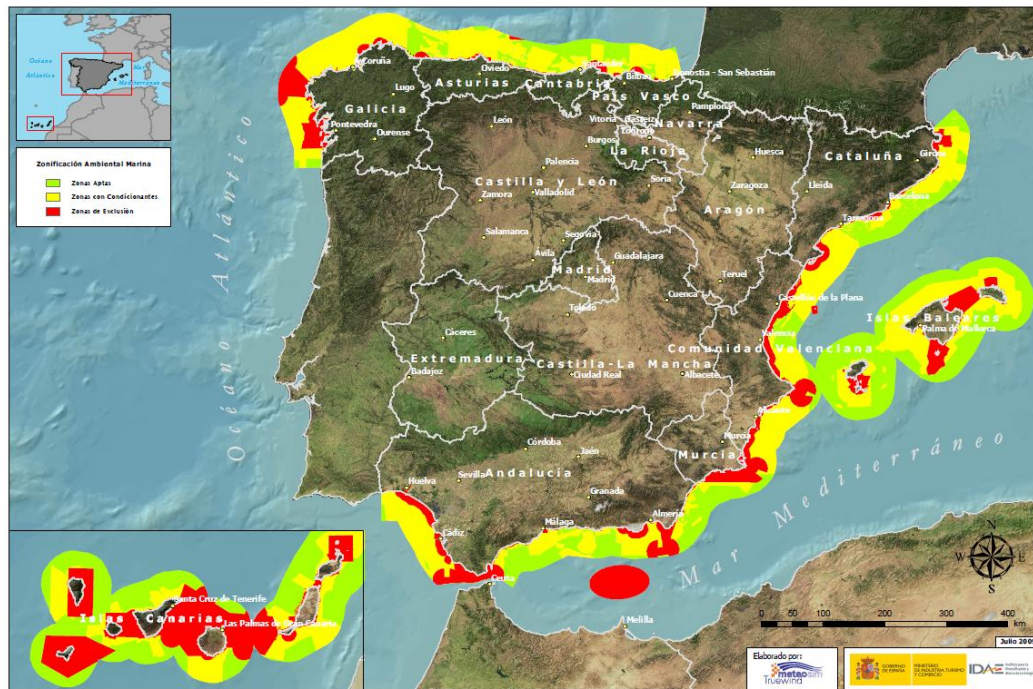


Figura 15. Mapa de zonificación ambiental marina para parques eólicos en España. [13]

En el mapa se pueden diferenciar tres zonas distintas. La zona verde representa la zona apta para la instalación de aerogeneradores, la amarilla es apta pero con ciertos condicionantes, y la zona roja no es apta.

En este estudio se ha considerado la zona amarilla como válida, sin embargo, dicha zona puede no ser considerada apta dependiendo del proyecto que se vaya a llevar a cabo. Para proyectos en zonas más concretas, habrá que recurrir a la normativa correspondiente a dichas zonas y comprobar que el proyecto que se quiere llevar a cabo cumple dicha normativa.

Otro factor a tener en cuenta es la profundidad a la que se colocan los aerogeneradores. En España, la mayor profundidad a la que se han implantado aerogeneradores marinos es a 50 metros [18], por lo tanto, se tomarán como zonas válidas aquellas que tengan una profundidad menor de 50 metros.

El último limitante a tener en cuenta es la velocidad del viento. En la estimación del potencial eólico terrestre se tomó como velocidad mínima 6 m/s, mientras que en este caso se ha estimado que la velocidad mínima a tener en cuenta para la instalación de los aerogeneradores sea 7,5 m/s. Este cambio se debe a que los aerogeneradores marinos tienen una mayor potencia, por lo que también funcionan a velocidades más altas.



## *ESTIMACIÓN DE LA MÁXIMA APORTACIÓN EÓLICA AL CONSUMO ELÉCTRICO EN ESPAÑA*

Teniendo en cuenta todas estas restricciones, el área marina disponible para la instalación de aerogeneradores es de 1412 km<sup>2</sup>.

Sup lit apta [km <sup>2</sup> ]	Sup lit cond [km <sup>2</sup> ]	Sup lit apta >-50 [km <sup>2</sup> ]	Sup lit cond >-50 [km <sup>2</sup> ]	Sup lit apta >7.5 [km <sup>2</sup> ]	Sup lit cond >7.5 [km <sup>2</sup> ]	Sup tot disp. [km <sup>2</sup> ]
84666	89759	512	6110	31	1381	1412

**Tabla 3. Superficie disponible marina para instalar aerogeneradores.**

Con la estimación previa de la densidad de potencia, se concluye que el potencial eólico marino en España disponible es de **8.5 GW**.

Actualmente no hay potencia eólica marina instalada en España, y con la tecnología actual disponible, se puede aprovechar poco la gran extensión de costas existentes como se puede comprobar con los resultados obtenidos. Sin embargo, una alternativa muy atractiva serían los aerogeneradores flotantes. Actualmente están en fase de diseño y desarrollo, pero a largo plazo podría ser una buena solución. Los aerogeneradores flotantes consisten en unas turbinas situadas en una estructura anclada con cables de acero al fondo marino. Una de las mayores limitaciones en las costas españolas es la profundidad a la que se sitúan los aerogeneradores, mientras que con las turbinas flotantes no se tendría ese problema.

Recapitulando los resultados obtenidos en la estimación del potencial eólico, teniendo en cuenta los potenciales eólicos tanto terrestre como marino, se obtiene un potencial eólico total de **279 GW**, un número muy superior a los 23 GW que ya están instalados.



## **4. COSTES**

En este capítulo, nos disponemos a evaluar el coste de todo el proyecto, analizando su rentabilidad. Al ser un proyecto de gran envergadura, se espera que la inversión inicial sea de grandes proporciones. Para tener una referencia sobre los costes, se han consultado proyectos anteriores ya realizados sobre parques eólicos. [19][20][21][22] A la hora de realizar un proyecto sobre la instalación de parques eólicos, se han de contemplar en la inversión inicial, además de la compra de los aerogeneradores, otros desembolsos necesarios para la construcción de un parque eólico, como la obra civil o la estructura eléctrica.

En el presupuesto de la obra civil, se abarca la cimentación del aerogenerador y los viales y plataformas correspondientes a instalar. En el apartado de electricidad hay que tener en cuenta las canalizaciones, líneas de tensión, la puesta a tierra y la fibra óptica.

El **artículo 58 del Real Decreto 1955/2000**, por el cual se regulan las actividades de transporte, distribución y suministro de instalaciones de energía eléctrica, regula la instalación de una subestación. [23]

La principal función de la subestación es la producción, conversión, transformación, regulación, repartición y distribución de la energía eléctrica. La subestación debe modificar y establecer los niveles de tensión de una infraestructura eléctrica, para que la energía eléctrica pueda ser transportada y distribuida.

Para la instalación de equipos de medida de producción de energía eléctrica, se usará la regulación del **Real Decreto 413/2014** [24] y el **Real Decreto 1110/2007**. [25]





## *ESTIMACIÓN DE LA MÁXIMA APORTACIÓN EÓLICA AL CONSUMO ELÉCTRICO EN ESPAÑA*

Por último, los gastos de gestión incluyen impuestos de construcción, instalación y obras, tasa por licencia de obras, compensación urbanística, licencia de actividad y el gasto de compensación urbanística.

A la hora de realizar los costes no se ha tenido en cuenta toda la potencia eólica que se podría extraer. Teniendo en cuenta la demanda eléctrica española y la potencia eólica ya instalada, bastaría con instalar **103 GW** para abastecer la demanda. Por lo tanto, los costes se han realizado instalando únicamente 103 GW.

En la tabla 4, aparece el desglose de la inversión inicial total.

Inversión inicial	Millones de euros/MW	MW	Millones de euros totales
<b>Aerogenerador</b>	1	103000	103000
<b>Obra civil</b>	0.041	103000	1223
<b>Electricidad</b>	0.075	103000	7725
<b>Subestación</b>	0.1	103000	10300
<b>Gastos de gestión</b>	0.014	103000	1442
<b>TOTAL</b>			126690

**Tabla 4. Desglose de la inversión inicial.**

La inversión inicial sería de 126690 millones de euros. Este valor se corresponde con un 11.5% del PIB de España aproximadamente.

Como se observa en la figura 16, la partida correspondiente a la compra de los aerogeneradores supondrá la partida más importante siendo aproximadamente del **80% del presupuesto total**.





## ESTIMACIÓN DE LA MÁXIMA APORTACIÓN EÓLICA AL CONSUMO ELÉCTRICO EN ESPAÑA

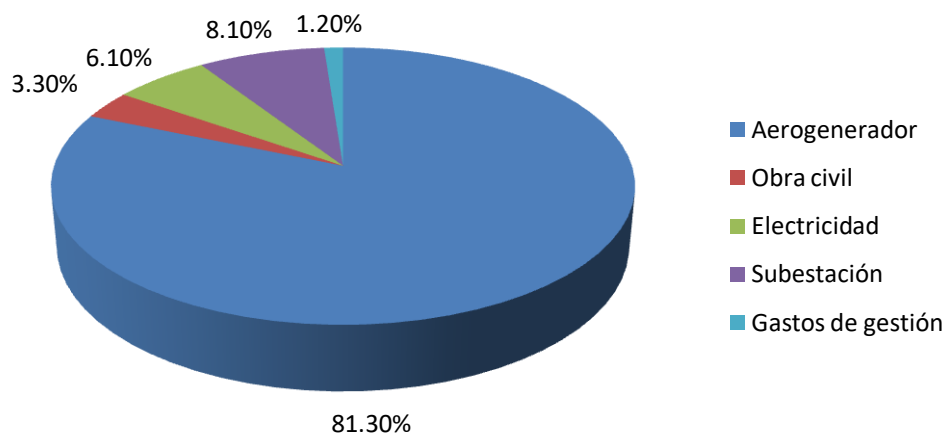


Figura 16. Desglose de la inversión inicial.

En la realización de un estudio económico, además de los gastos de la inversión inicial realizada, habrá que contemplar otros gastos de gestión de establecimiento y de funcionamiento, y los ingresos por la venta de energía producida.

Los gastos anuales se desglosan en el salario del personal de mantenimiento, el alquiler de terreno, la cuota de sostenibilidad, y los impuestos.

Dentro de los impuestos nos encontramos con el impuesto de bienes inmuebles (IBI) y el impuesto de actividades económicas (IAE).

Gastos anuales	Millones de euros/MW	MW	Millones de euros totales
Cuota de sostenibilidad			473.8
Alquiler de terreno	0.002	103000	206
Impuestos	0.001	103000	103
Personal			1297.8
TOTAL			2080.6

Tabla 5. Desglose de los gastos anuales

Una vez analizados los gastos anuales, hay que estimar los ingresos anuales. Para realizar esta estimación se ha considerado que el precio por MWh es constante. Dicho valor varía a lo largo del tiempo, pero como se desconoce en qué medida variará, se ha decidido tomar el precio actual por MWh.



Los ingresos que se realizan a lo largo del año se deben a la venta de energía eléctrica, la cual está regulada según el **Real Decreto 661/2007** [26]. Dicha normativa regula la actividad de producción de energía eléctrica, y establece en el capítulo IV el régimen económico que se aplica a la producción de energía eólica. Por ello, los titulares de las instalaciones deben elegir entre una tarifa reguladora o la opción de mercado. Para este proyecto se ha decidido escoger la opción de tarifa reguladora, para tener un precio por MWh constante.

El Gobierno aprobó el **Real Decreto 2/2013** [27] mediante el cual se estableció una tarifa regulada para el sector eólico de 81.25 euros/MWh. A esta tarifa hay que descontarle el impuesto sobre el valor de la producción de energía eléctrica (IVPEE) del 7% introducido por la **Ley 15/2012** [28]. Teniendo en cuenta este impuesto, el precio final de la tarifa reguladora se quedaría en 75.55 euros/MWh.

Las horas de producción de energía eléctrica a partir de tecnologías solar termoelectrica y eólica, están limitadas según el **Real Decreto 413/2014**. [29]

Para calcular la energía producida en un año, basta con multiplicar los 103 GW instalados (potencia instalada) por las horas de funcionamiento de los aerogeneradores en un año. De acuerdo con el estudio técnico del Atlas eólico en España [17], a lo largo de un año los aerogeneradores en España funcionan una media de 2100 horas. Por lo tanto, obtenemos un total de **216.3 TWh/año**.

Con la tarifa fija reguladora de 75.55 euros/MWh, se obtienen unos ingresos anuales de **16341.465 millones de euros al año**.

Hay que tener en cuenta también que además de las posibles fluctuaciones en el precio del MWh si varía la legislación vigente, puede haber variaciones en las horas de funcionamiento de los aerogeneradores de un año a otro. Por ello estas estimaciones son aproximadas.

Una vez conocidos dichos gastos e ingresos, es posible analizar el período de recuperación o pay-back, para estudiar en cuánto tiempo se recuperará la inversión inicial mediante flujos de caja. También será interesante analizar la Tasa interna de rentabilidad (TIR).

Se han realizado dichos análisis con 3 valores distintos para la tarifa regulada del MWh. Con este análisis de sensibilidad es posible estudiar entre qué rangos es rentable realizar el proyecto.

A continuación se representa el período de Pay-back según las distintas tarifas reguladas, obteniendo el punto exacto en el que se recuperaría el desembolso inicial para cada caso.

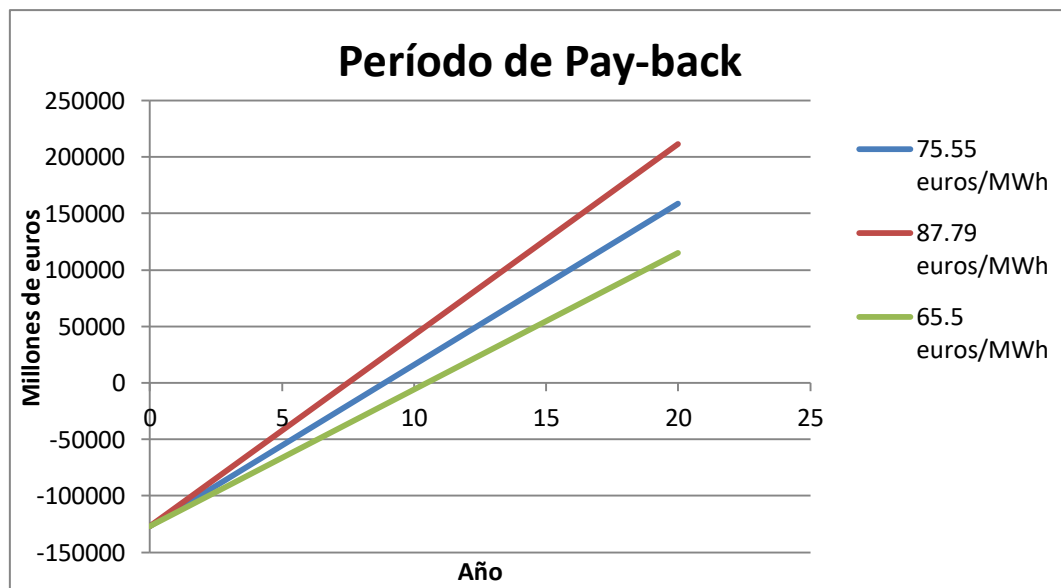


Figura 17. Representación gráfica del período de Pay-back.

Como se observa en la figura 17, en **9 años** empezarían a producirse los beneficios de este proyecto con la tarifa actual de 75.55 euros/MWh, un período bastante corto teniendo en cuenta la magnitud del proyecto.

Como era de esperar, con un aumento de la tarifa del MWh, aumentarían los ingresos anuales, por lo que el período de pay-back se reduciría, mientras que con una tarifa menor a la actual ocurriría lo contrario.

La vida media de un aerogenerador se sitúa en unos 20 años, por lo que se evalúa la tasa interna de rentabilidad (TIR) en ese período de tiempo. Para el proyecto actual se ha obtenido un TIR del **9.4%**. En el caso de una tarifa para el MWh mayor, el TIR sería del 12%, obteniendo un mayor beneficio, mientras que con una tarifa menor la rentabilidad disminuiría hasta un 7.1%.

Por último se ha realizado un presupuesto de este proyecto en el que se ha tenido en cuentas las horas de trabajo realizado, que se puede observar en la tabla 6.

Concepto	Coste [euros/h]	Horas	Total [euros]
Ingeniero Junior	20	300	6000
Internet	1	300	300
Transporte			40
IVA (21%)			1331.4
TOTAL			7671.4

Tabla 6. Desglose del presupuesto del proyecto.



***ESTIMACIÓN DE LA MÁXIMA APORTACIÓN EÓLICA AL CONSUMO ELÉCTRICO  
EN ESPAÑA***



## **5. CONCLUSIONES**

Recordando algunos datos que se introdujeron al inicio del proyecto, la demanda eléctrica española en 2015 fue de **262.931 TWh/año** [8]. Si comparamos este valor con la energía eléctrica máxima que se podría llegar a producir en España mediante aerogeneradores, es decir, **585.9 TWh/año**, comprobamos que supera con creces la demanda. Hay que tener en cuenta a su vez, los aerogeneradores ya instalados, que producen **48.109 TWh/año**.

Para satisfacer la demanda eléctrica, bastaría con instalar el **36.67%** de la potencia eólica máxima que podría instalarse, es decir, **103 GW**. Esta reducción del número de aerogeneradores instalados equivaldría a una inversión inicial de **126690 millones de euros**, suponiendo constante el precio de aerogeneradores.

Esto significa que España podría dejar de tener esa dependencia energética que sufre en la actualidad y podría llegar a ser autosuficiente. Para ello, debe apostar por las energías renovables, en concreto por la energía eólica, y aprovechar los recursos geográficos que se disponen.

En 2015 la potencia eólica instalada en España era de **23 GW** [8]. Después de haber realizado los cálculos correspondientes se ha concluido que se podrían llegar a instalar **279 GW** en todo el territorio español. Esto supone que sólo está instalado poco más del 8% de toda la capacidad máxima posible.



Aunque pueda parecer que inicialmente el desembolso para realizar el proyecto sea desproporcionado, se ha demostrado que en **9 años** se recuperaría toda la inversión inicial realizada, con un TIR a los 20 años del **9.4%**. Sin embargo, los períodos de amortización calculados pueden variar en función de los ingresos y gastos anuales, los cuales se han considerado constantes.

El flujo de caja anual puede variar si cambia la legislación que apela a las primas de la energía eólica, variando el precio de la tarifa reguladora. A su vez, puede haber gastos anuales imprevistos, como los causados por un fallo mecánico en los aerogeneradores.

No hay que olvidar que la energía eólica es intermitente, por lo que siempre existe una incertidumbre sobre la producción real que se puede obtener de los aerogeneradores.

Las horas de funcionamiento de los aerogeneradores, la potencia real obtenida en cada emplazamiento, y la velocidad del viento son variables fluctuantes que dependerán directamente de la climatología.

Por lo tanto, los números calculados en este proyecto no dejan de ser estimaciones, basados en mediciones reales.



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] La energía en España 2015. (2016). 1st ed. [PDF] Available at: <http://www.minetad.gob.es/energia/balances/Balances/Paginas/Balances.aspx> [Accessed 5 Feb. 2017].
- [2] Nuclear, L. (2017). *Las ventajas de la energía nuclear - Twenergy*. [online] Twenergy.com. Available at: <https://twenergy.com/a/las-ventajas-de-la-energia-nuclear-390> [Accessed 27 Feb. 2017].
- [3] Anon (2017). [online] Available at: <https://energia-nuclear.net/situacion/energia-nuclear-espana/moratoria-nuclear.html> [Accessed 27 Feb. 2017].
- [4] ABC. (2017). *Todas las claves para entender qué es el «fracking» o la fractura hidráulica*. [online] Available at: <http://www.abc.es/economia/20140316/abc-claves-fracking-201403142041.html> [Accessed 1 Apr. 2017].
- [5] Boletín de Medio Ambiente. ELA Sindikatua. (2014)
- [6] La Informacion. (2017). *Siete de los diez mayores productores de paneles solares son chinos*. [online] Available at: [http://www.lainformacion.com/economia-negocios-y-finanzas/empresas/siete-de-los-diez-mayores-productores-de-paneles-solares-son-chinos\\_XCksvj28upjj0dkrDASSr2/](http://www.lainformacion.com/economia-negocios-y-finanzas/empresas/siete-de-los-diez-mayores-productores-de-paneles-solares-son-chinos_XCksvj28upjj0dkrDASSr2/) [Accessed 1 Apr. 2017].
- [7] GLOBAL STATISTICS | GWEC. (2017). [online] Gwec.net. Available at: <http://www.gwec.net/global-figures/graphs/> [Accessed 17 Feb. 2017].
- [8] El Sistema Eléctrico Español 2015. (2016). 1st ed. [PDF] Available at: <http://www.ree.es/es/estadisticas-del-sistema-electrico-espanol/informe-anual/informe-del-sistema-electrico-espanol-2015> [Accessed 17 Feb. 2017].
- [9] Real Decreto 1/2012. Boletín Oficial del Estado, Madrid, España, 28 de enero de 2012. (BOE núm. 24)
- [10] Muy Interesante. (2017). *¿Cuánta electricidad produce un aerogenerador?*. [online] Available at: <https://www.muyinteresante.es/curiosidades/preguntas-respuestas/icuanta-electricidad-produce-un-aerogenerador> [Accessed 29 Jun. 2017].
- [11] Prats, P. (2017). *El éxito del viento*. [online] Revista Mètode. Available at: <https://metode.es/revistas-metode/monograficos/el-exito-del-viento.html> [Accessed 29 Jun. 2017].
- [12] Aerogeneradores Enercon. Gama de productos.



- [13] Atlaseolico.idae.es. (2017). *IDAE / Gobierno de España / Atlas Eólico de España*. [online] Available at: <http://atlaseolico.idae.es/> [Accessed 30 Jun. 2017].
- [14] Es.wikipedia.org. (2017). *Costas de España*. [online] Available at: [https://es.wikipedia.org/wiki/Costas\\_de\\_Espa%C3%B1a](https://es.wikipedia.org/wiki/Costas_de_Espa%C3%B1a) [Accessed 30 Jun. 2017].
- [15] ABB. Cuaderno de aplicaciones técnicas nº 12. Plantas eólicas. ABB, Barcelona, 2012.
- [16] Ley 42/2007. Boletín Oficial del Estado, Madrid, España, 14 de diciembre de 2007. (BOE núm. 299)
- [17] Análisis del recurso. Atlas eólico de España. IDAE, Madrid, 2011.
- [18] Idae.es. (2017). *Eólica marina*. [online] Available at: <http://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/uso-electrico/eolica/eolica-marina> [Accessed 21 Jul. 2017].
- [19] Raúl Díaz Hernández (2013). *Viabilidad de la cogeneración eólica en las plantas desaladoras*. Universidad Carlos III, Madrid, España.
- [20] Juan Manuel Molina Medina (2012). *Estudio de viabilidad técnico-económica de un parque eólico de 40MW de potencia*. Universidad de Barcelona, Barcelona, España
- [21] Álvaro Molinero Benítez (2009). *Proyecto de un parque eólico*. Universidad Pontificia Comillas, Madrid, España.
- [22] José Joaquín Miranda García (2008). *Estudio y planificación de un parque eólico*. Universidad Pontificia Comillas, Madrid, España.
- [23] Real Decreto 1955/2000. Boletín Oficial del Estado, Madrid, España, 27 de diciembre de 2000. (BOE núm. 310)
- [24] Real Decreto 413/2014. Boletín Oficial del Estado, Madrid, España, 6 de junio de 2014. (BOE núm. 140)
- [25] Real Decreto 1110/2007. Boletín Oficial del Estado, Madrid, España, 24 de agosto de 2007. (BOE núm. 224)
- [26] Real Decreto 661/2007. Boletín Oficial del Estado, Madrid, España, 25 de mayo de 2007. (BOE núm. 126)
- [27] Real Decreto 2/2013. Boletín Oficial del Estado, Madrid, España, 1 de febrero de 2013. (BOE núm. 29)
- [28] Ley 15/2012. Boletín Oficial del Estado, Madrid, España, 28 de diciembre de 2012. (BOE núm. 312)





***ESTIMACIÓN DE LA MÁXIMA APORTACIÓN EÓLICA AL CONSUMO ELÉCTRICO  
EN ESPAÑA***

[27] Real Decreto 2/2013. Boletín Oficial del Estado, Madrid, España, 1 de febrero de 2013. (BOE núm. 29)

[28] Real Decreto 413/2014. Boletín Oficial del Estado, Madrid, España, 6 de junio de 2014. (BOE núm. 140)



***ESTIMACIÓN DE LA MÁXIMA APORTACIÓN EÓLICA AL CONSUMO ELÉCTRICO  
EN ESPAÑA***



# ANEXO A

En el anexo que se adjunta a continuación, se visualizan los parámetros que se han tenido en cuenta según cada comunidad autónoma para estimar el potencial eólico en España.

Para cada comunidad se muestran 4 apartados distintos. Arriba a la izquierda aparecerá el mapa eólico de la comunidad a una altitud de 80 metros, proporcionado por IDAE [13]. Gracias a este mapa, se ha podido estimar las áreas en las que el viento era insuficiente. Arriba a la derecha se muestra la función de Weibull que se ha realizado según los parámetros de Weibull de cada zona y que será necesaria para estimar la potencia que se puede extraer de un generador. Abajo a la izquierda se adjunta la rosa de los vientos proporcionada de nuevo por IDAE para analizar la posición en la que se colocarán los aerogeneradores. Por último, abajo a la derecha se representa una tabla en la que aparecen los cálculos realizados para estimar el potencial eólico de cada comunidad autónoma.



## ESTIMACIÓN DE LA MÁXIMA APORTACIÓN EÓLICA AL CONSUMO ELÉCTRICO EN ESPAÑA

### 1. ANDALUCÍA

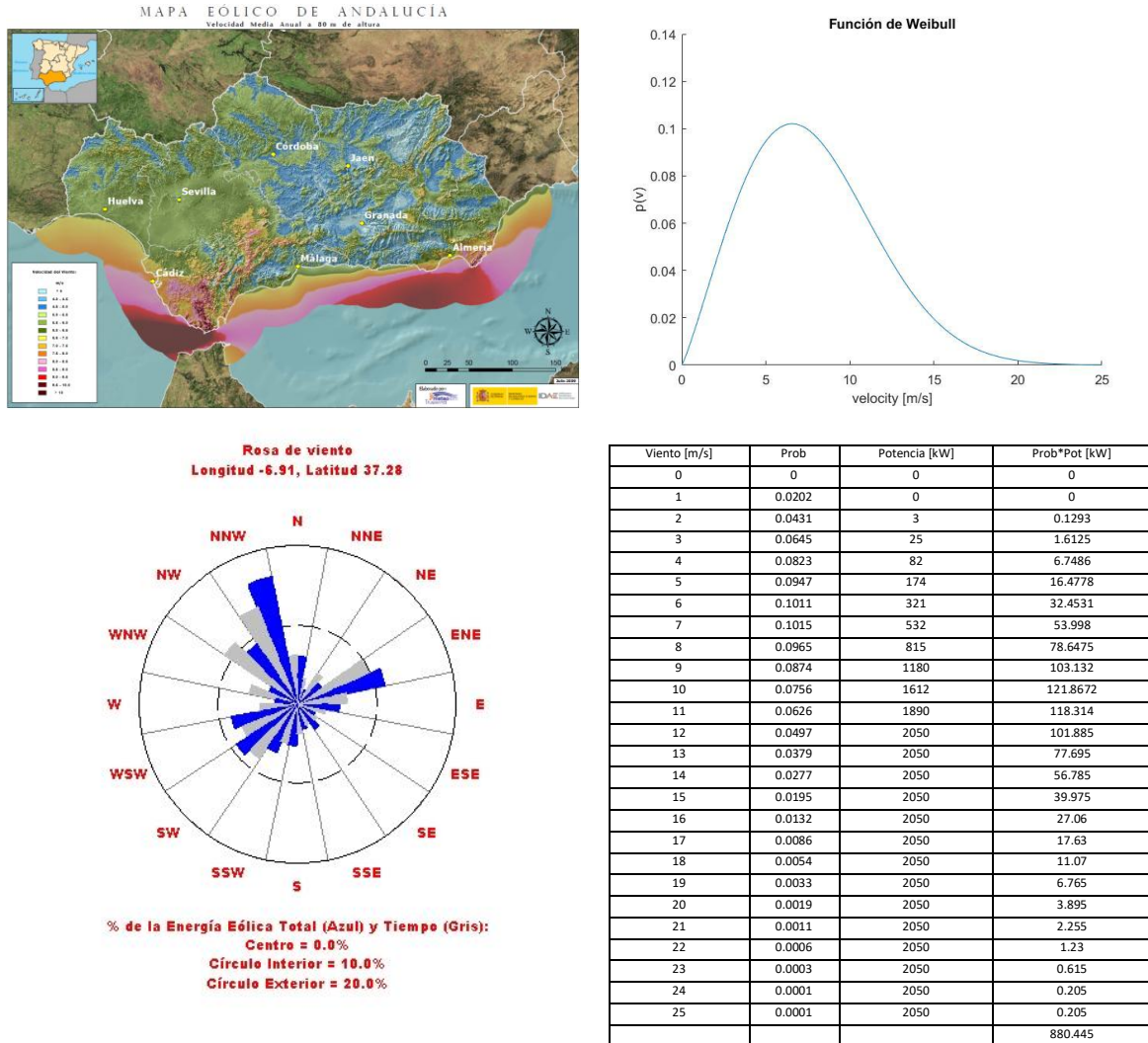


Figura 18. Arriba a la izquierda mapa eólico de Andalucía [13], arriba a la derecha función de Weibull de Andalucía, abajo a la izquierda rosa de los vientos de Andalucía [13] y abajo a la derecha tabla de potencia media que proporciona un aerogenerador en Andalucía



## ESTIMACIÓN DE LA MÁXIMA APORTACIÓN EÓLICA AL CONSUMO ELÉCTRICO EN ESPAÑA

### 2. ARAGÓN

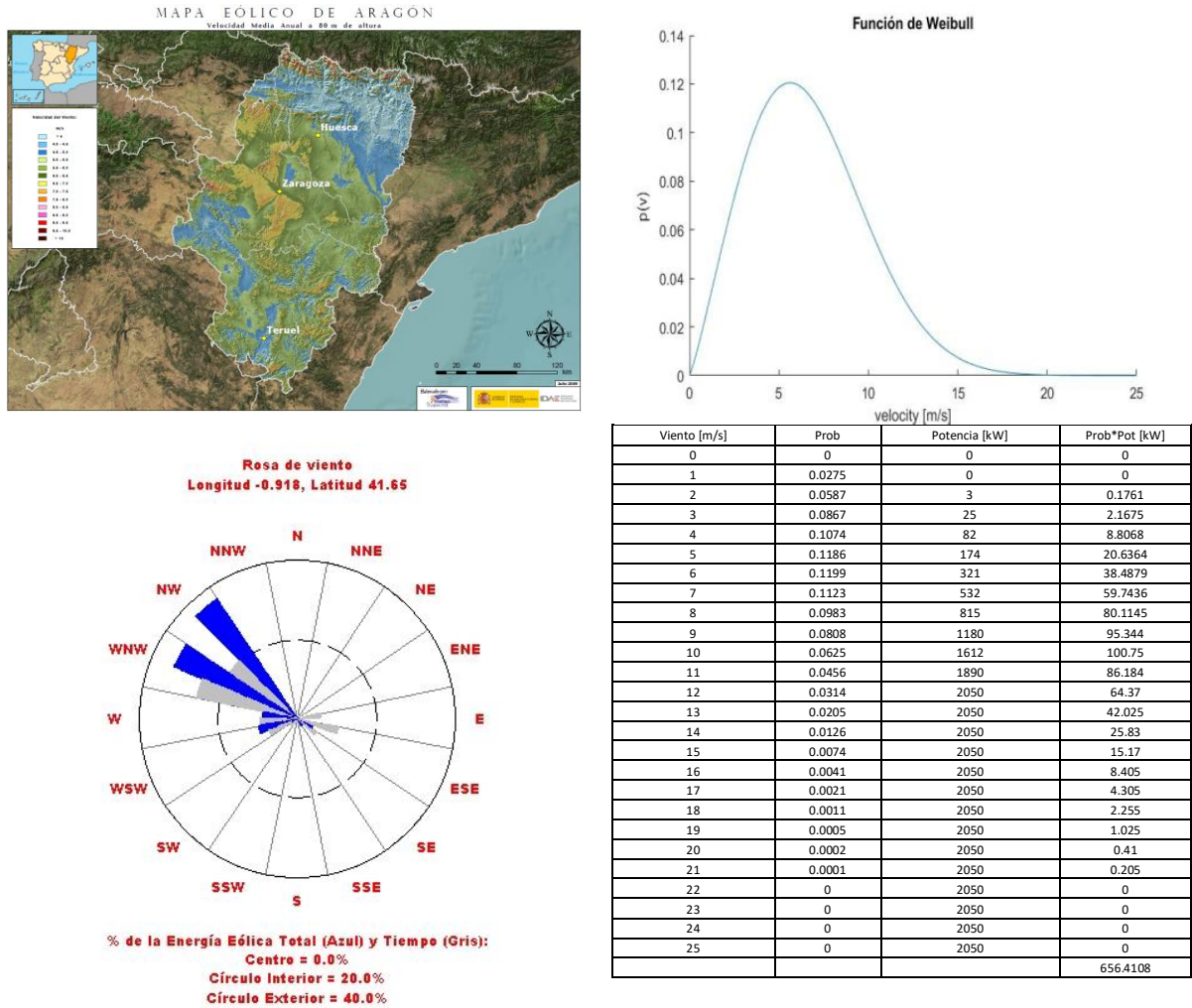


Figura 19. Arriba a la izquierda mapa eólico de Aragón [13], arriba a la derecha función de Weibull de Aragón, abajo a la izquierda rosa de los vientos de Aragón [13] y abajo a la derecha tabla de potencia media que proporciona un aerogenerador en Aragón.



## ESTIMACIÓN DE LA MÁXIMA APORTACIÓN EÓLICA AL CONSUMO ELÉCTRICO EN ESPAÑA

### 3. ASTURIAS

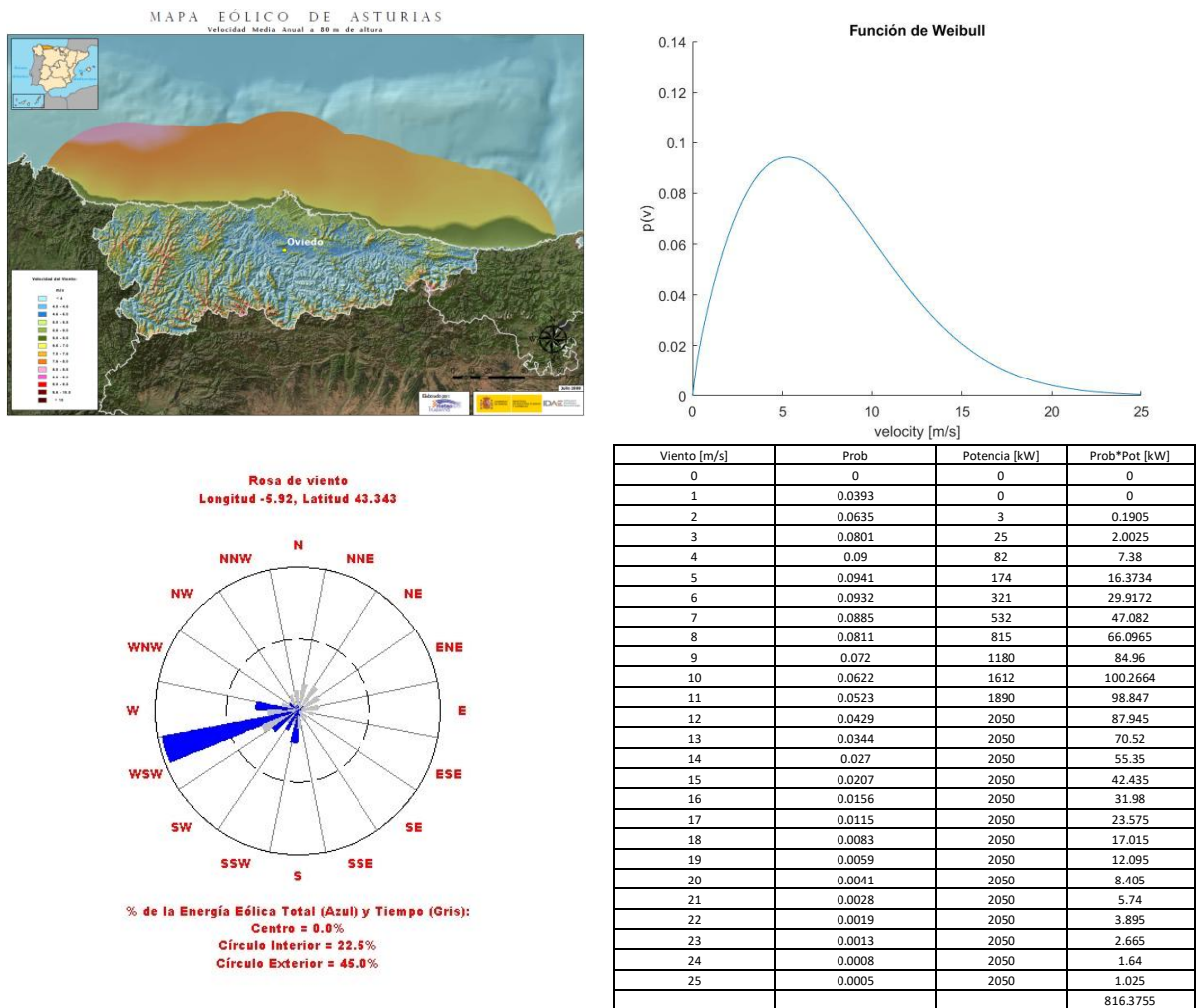


Figura 20. Arriba a la izquierda mapa eólico de Asturias [13], arriba a la derecha función de Weibull de Asturias, abajo a la izquierda rosa de los vientos de Asturias [13] y abajo a la derecha tabla de potencia media que proporciona un aerogenerador en Asturias.



## ESTIMACIÓN DE LA MÁXIMA APORTACIÓN EÓLICA AL CONSUMO ELÉCTRICO EN ESPAÑA

### 4. CANTABRIA

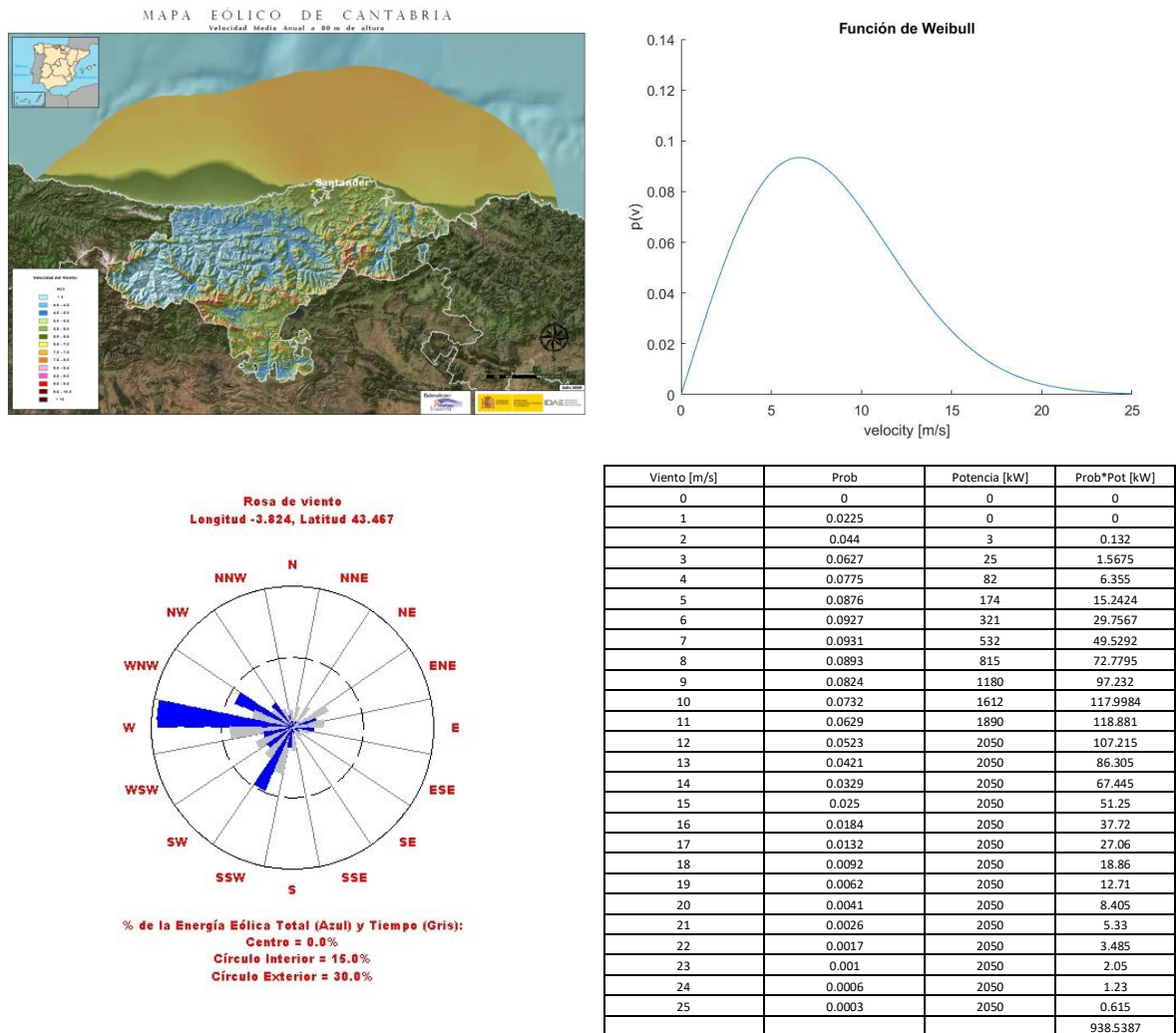


Figura 21. Arriba a la izquierda mapa eólico de Cantabria [13], arriba a la derecha función de Weibull de Cantabria, abajo a la izquierda rosa de los vientos de Cantabria [13] y abajo a la derecha tabla de potencia media que proporciona un aerogenerador en Cantabria.





## ESTIMACIÓN DE LA MÁXIMA APORTACIÓN EÓLICA AL CONSUMO ELÉCTRICO EN ESPAÑA

### 5. CASTILLA-LA MANCHA

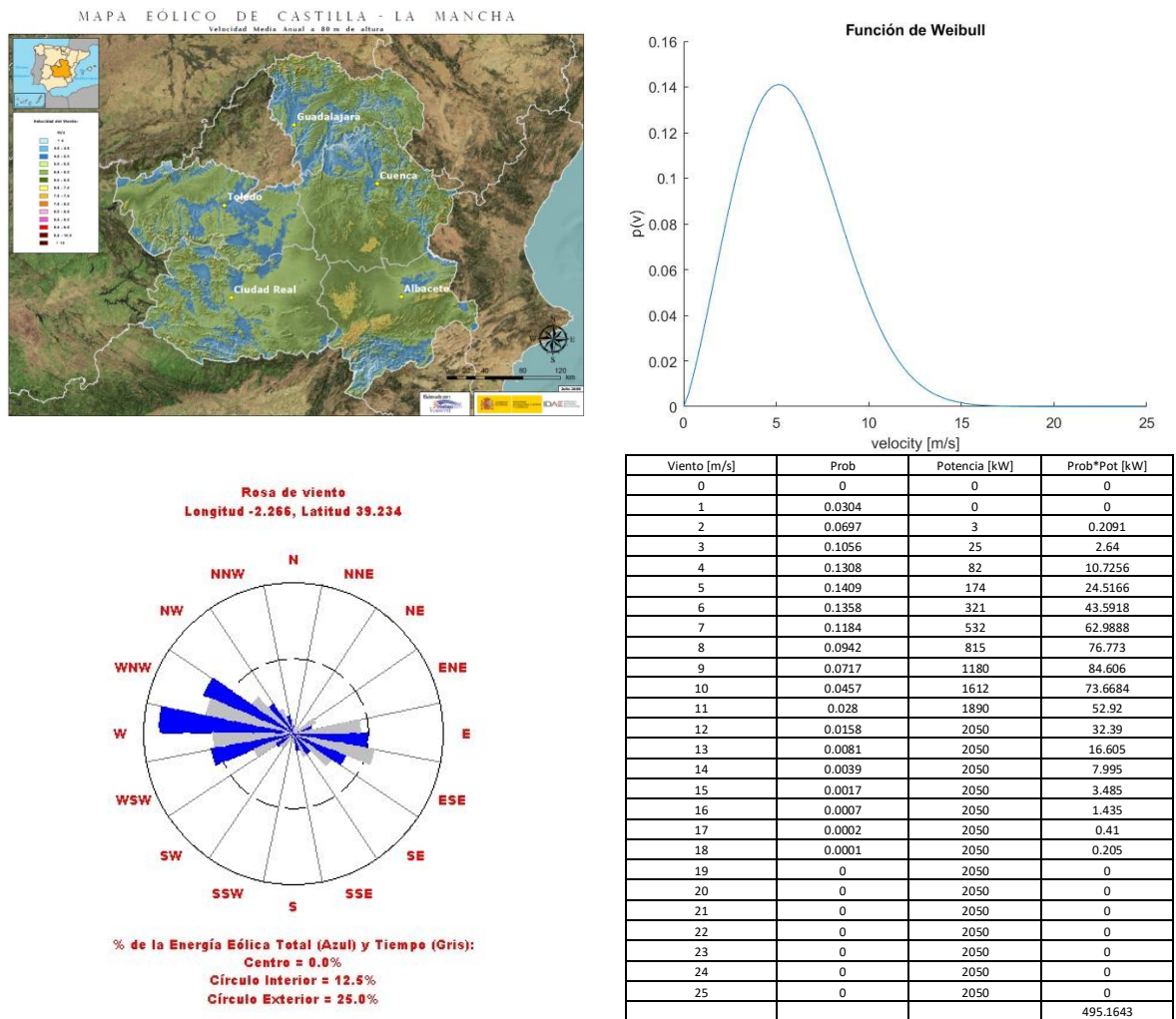


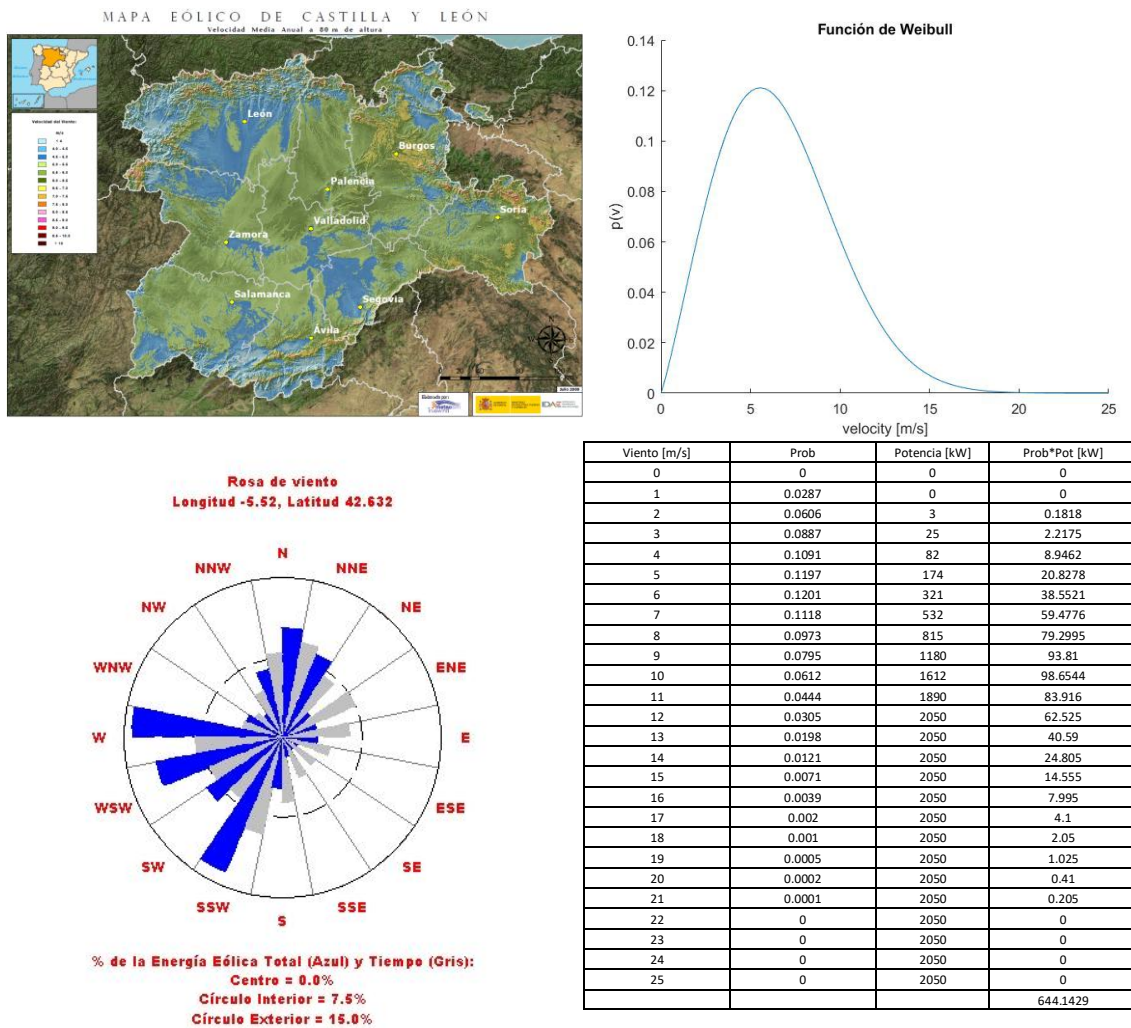
Figura 22. Arriba a la izquierda mapa eólico de Castilla-La Mancha [13], arriba a la derecha función de Weibull de Castilla-La Mancha, abajo a la izquierda rosa de los vientos de Castilla-La Mancha [13] y abajo a la derecha tabla de potencia media que proporciona un aerogenerador en Castilla-La Mancha.

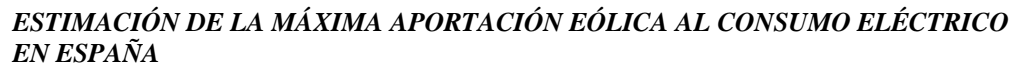




## ESTIMACIÓN DE LA MÁXIMA APORTACIÓN EÓLICA AL CONSUMO ELÉCTRICO EN ESPAÑA

### 6. CASTILLA Y LEÓN





Viento [m/s]	Prob	Potencia [kW]	Prob*Pot [kW]
0	0	0	0
1	0.0407	0	0
2	0.0733	3	0.2199
3	0.0971	25	2.4275
4	0.1111	82	9.1102
5	0.1155	174	20.097
6	0.1116	321	35.8236
7	0.1014	532	53.9448
8	0.0874	815	71.231
9	0.0717	1180	84.606
10	0.0563	1612	90.7556
11	0.0423	1890	79.947
12	0.0305	2050	62.525
13	0.0211	2050	43.255
14	0.0141	2050	28.905
15	0.0091	2050	18.655
16	0.0056	2050	11.48
17	0.0033	2050	6.765
18	0.0019	2050	3.895
19	0.0011	2050	2.255
20	0.0006	2050	1.23
21	0.0003	2050	0.615
22	0.0002	2050	0.41
23	0.0001	2050	0.205
24	0	2050	0
25	0	2050	0
			628.3576

58



## ESTIMACIÓN DE LA MÁXIMA APORTACIÓN EÓLICA AL CONSUMO ELÉCTRICO EN ESPAÑA

### 8. CEUTA

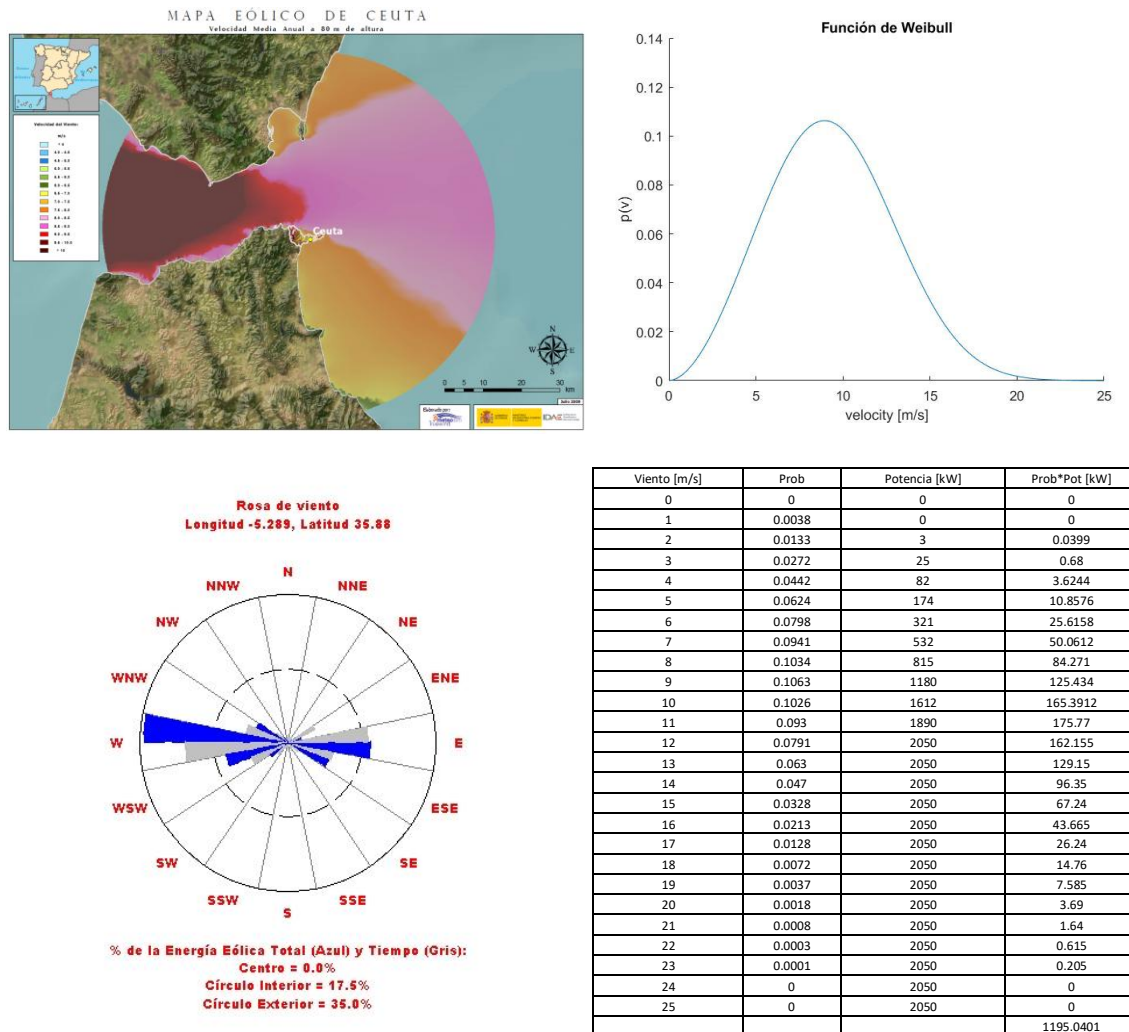


Figura 25. Arriba a la izquierda mapa eólico de Ceuta [13], arriba a la derecha función de Weibull de Ceuta, abajo a la izquierda rosa de los vientos de Ceuta [13] y abajo a la derecha tabla de potencia media que proporciona un aerogenerador en Ceuta.



## ESTIMACIÓN DE LA MÁXIMA APORTACIÓN EÓLICA AL CONSUMO ELÉCTRICO EN ESPAÑA

### 9. EXTREMADURA

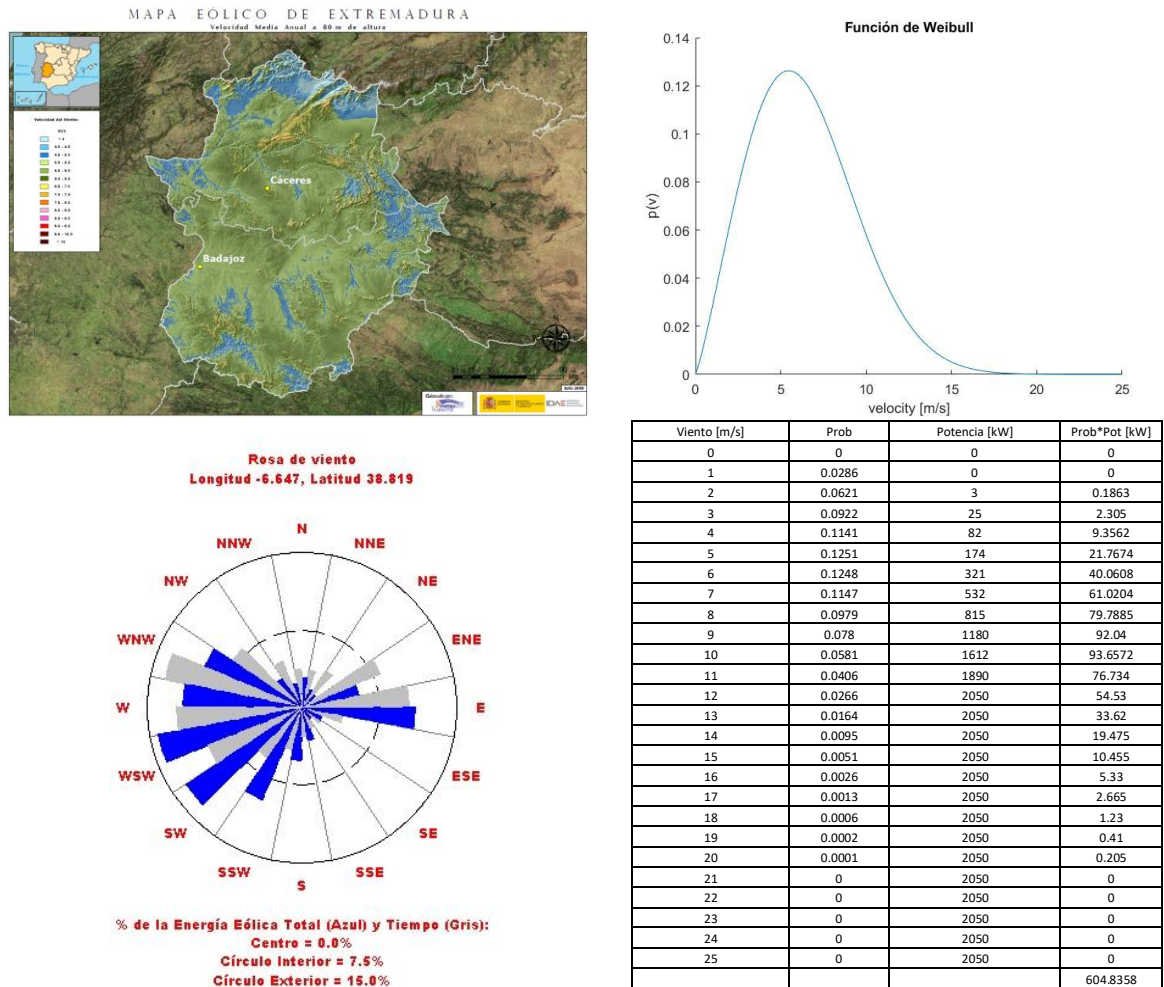


Figura 26. Arriba a la izquierda mapa eólico de Extremadura [13], arriba a la derecha función de Weibull de Extremadura, abajo a la izquierda rosa de los vientos de Extremadura [13] y abajo a la derecha tabla de potencia media que proporciona un aerogenerador en Extremadura.



## ESTIMACIÓN DE LA MÁXIMA APORTACIÓN EÓLICA AL CONSUMO ELÉCTRICO EN ESPAÑA

### 10. GALICIA

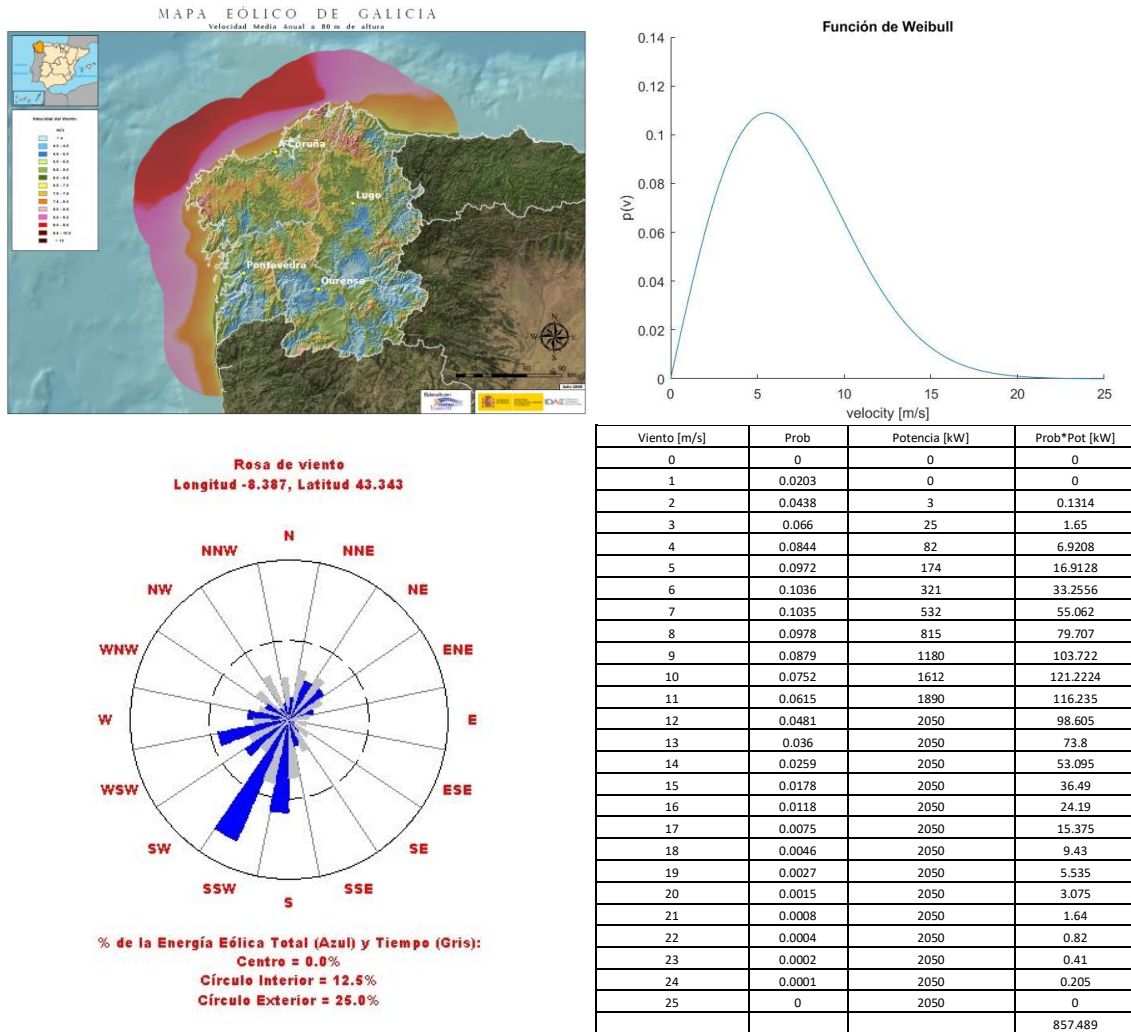


Figura 27. Arriba a la izquierda mapa eólico de Galicia [13], arriba a la derecha función de Weibull de Galicia, abajo a la izquierda rosa de los vientos de Galicia [13] y abajo a la derecha tabla de potencia media que proporciona un aerogenerador en Galicia.





## ESTIMACIÓN DE LA MÁXIMA APORTACIÓN EÓLICA AL CONSUMO ELÉCTRICO EN ESPAÑA

### 11. ISLAS BALEARES

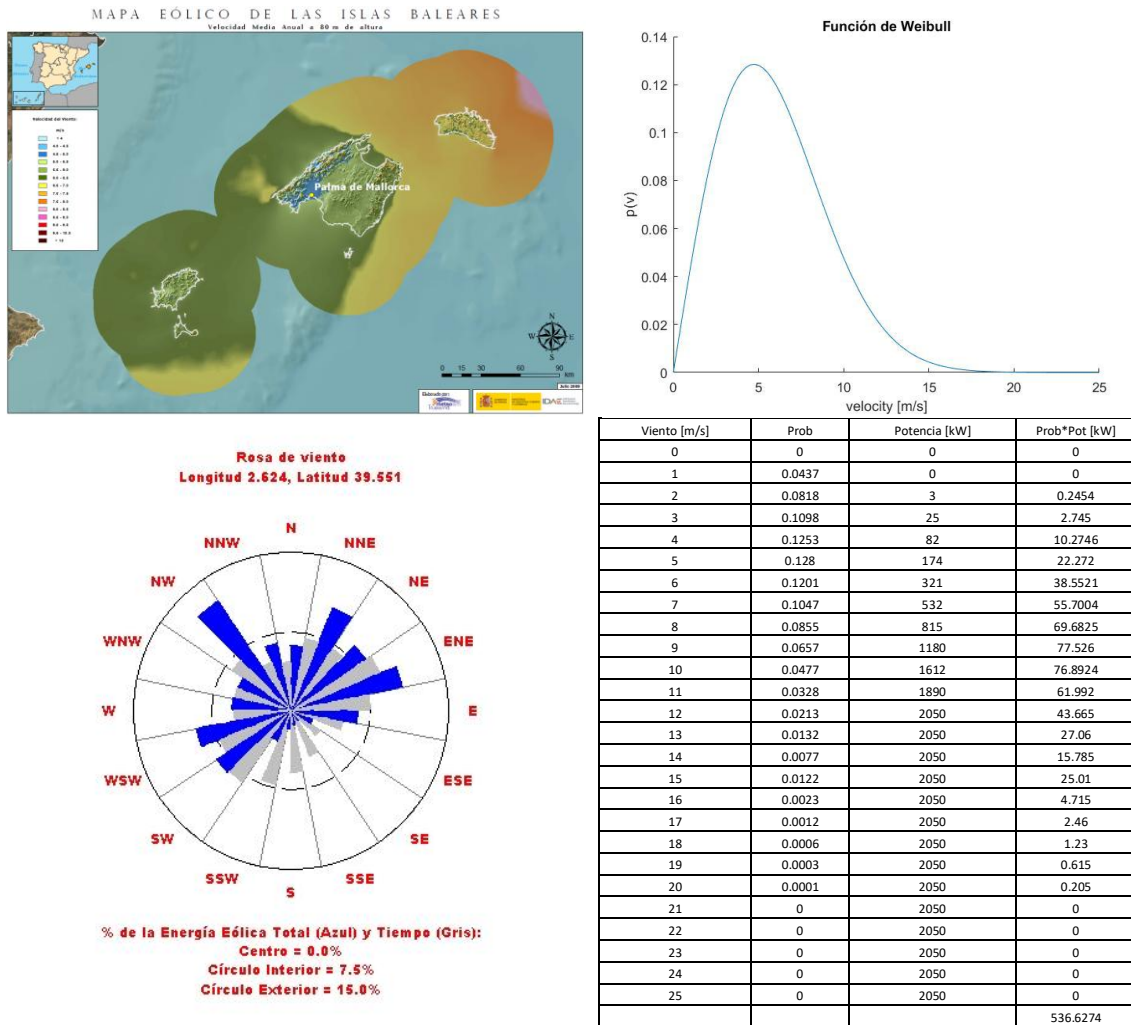


Figura 28. Arriba a la izquierda mapa eólico de las islas Baleares [13], arriba a la derecha función de Weibull de las islas Baleares, abajo a la izquierda rosa de los vientos de las islas Baleares [13] y abajo a la derecha tabla de potencia media que proporciona un aerogenerador en las islas Baleares.



## ESTIMACIÓN DE LA MÁXIMA APORTACIÓN EÓLICA AL CONSUMO ELÉCTRICO EN ESPAÑA

### 12. ISLAS CANARIAS

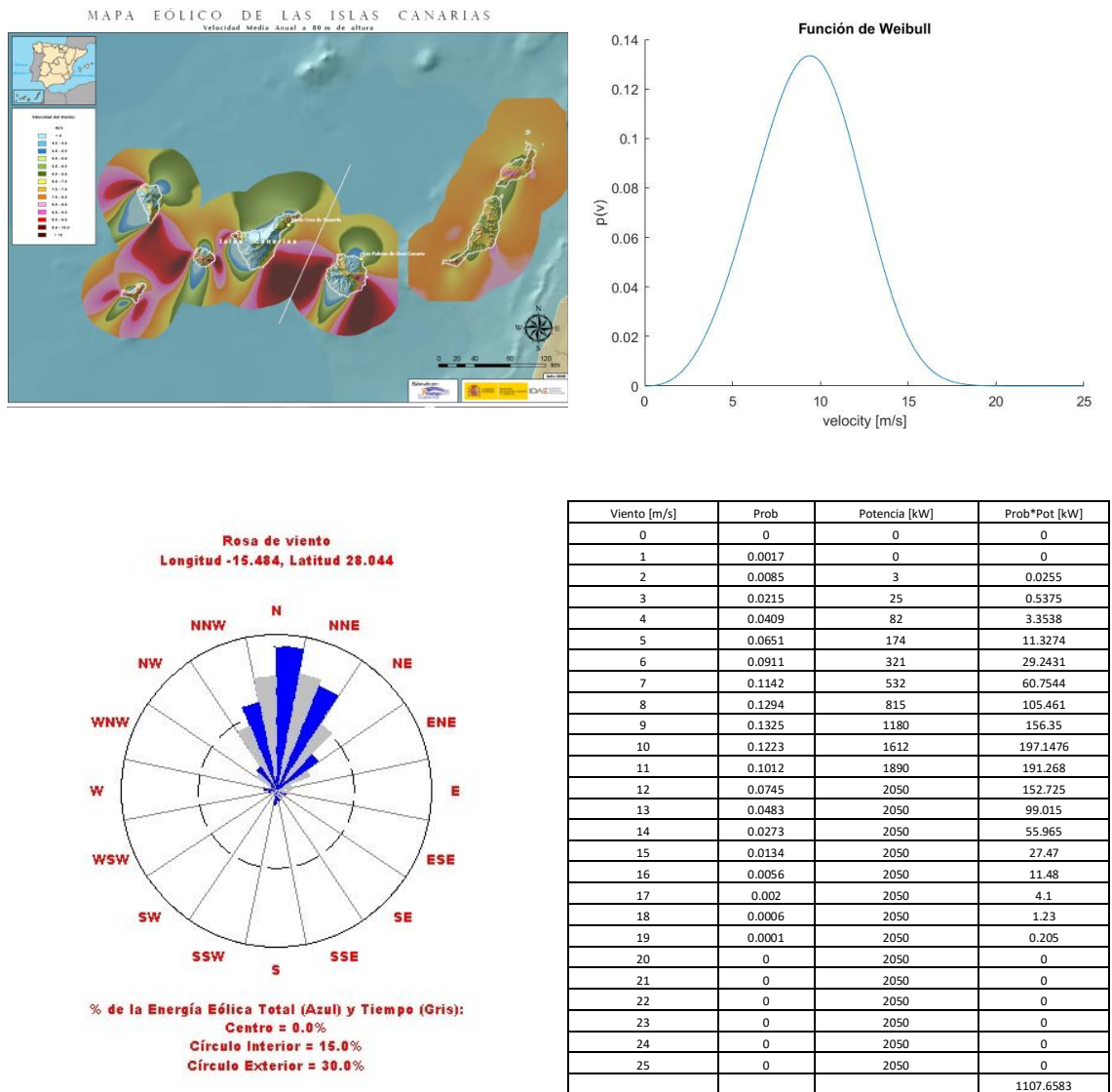


Figura 29. Arriba a la izquierda mapa eólico de las islas Canarias [13], arriba a la derecha función de Weibull de las islas Canarias, abajo a la izquierda rosa de los vientos de las islas Canarias [13] y abajo a la derecha tabla de potencia media que proporciona un aerogenerador en las islas Canarias.



## ESTIMACIÓN DE LA MÁXIMA APORTACIÓN EÓLICA AL CONSUMO ELÉCTRICO EN ESPAÑA

### 13. LA RIOJA

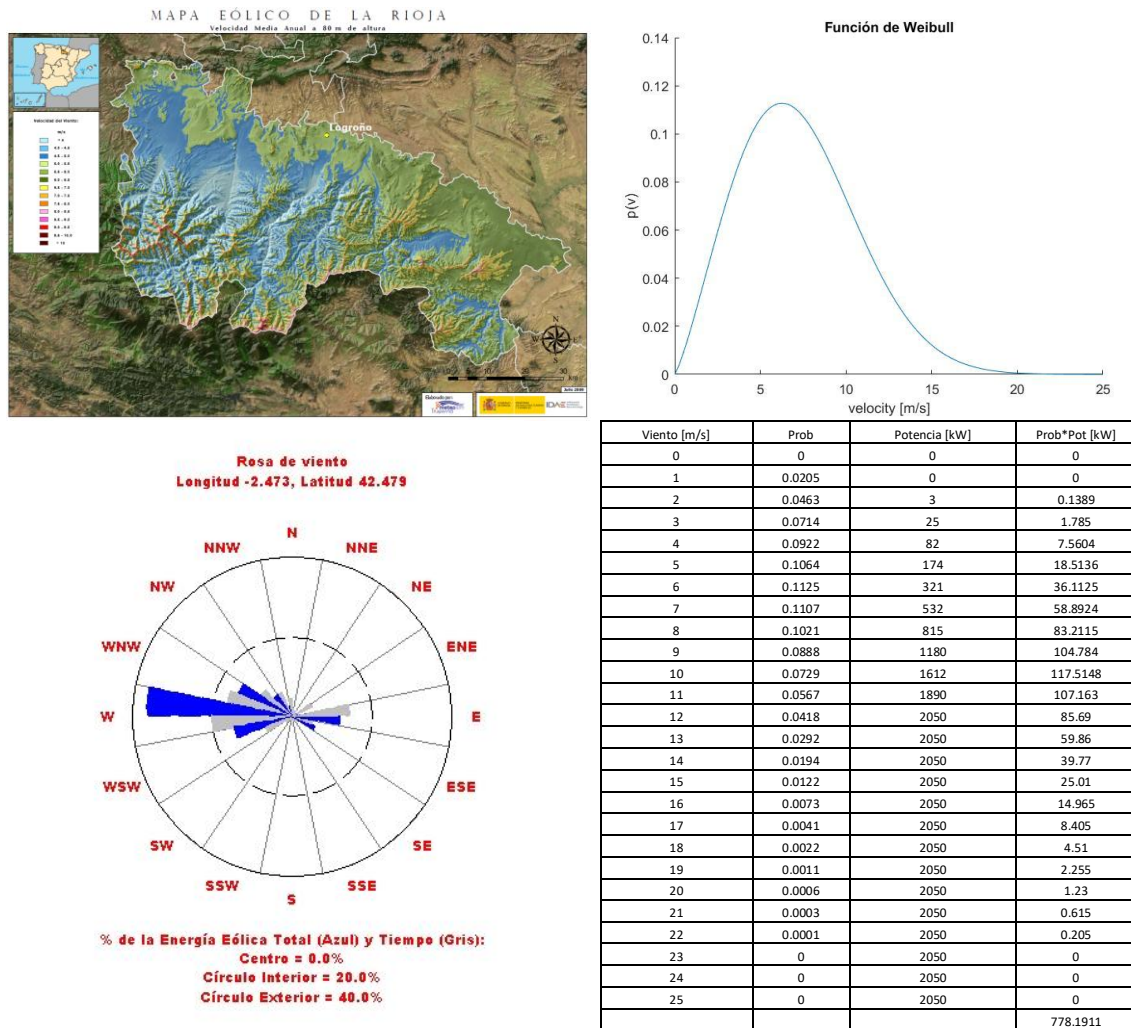


Figura 30. Arriba a la izquierda mapa eólico de la Rioja [13], arriba a la derecha función de Weibull de la Rioja, abajo a la izquierda rosa de los vientos de la Rioja [13] y abajo a la derecha tabla de potencia media que proporciona un aerogenerador en la Rioja.





## ESTIMACIÓN DE LA MÁXIMA APORTACIÓN EÓLICA AL CONSUMO ELÉCTRICO EN ESPAÑA

### 14. MADRID

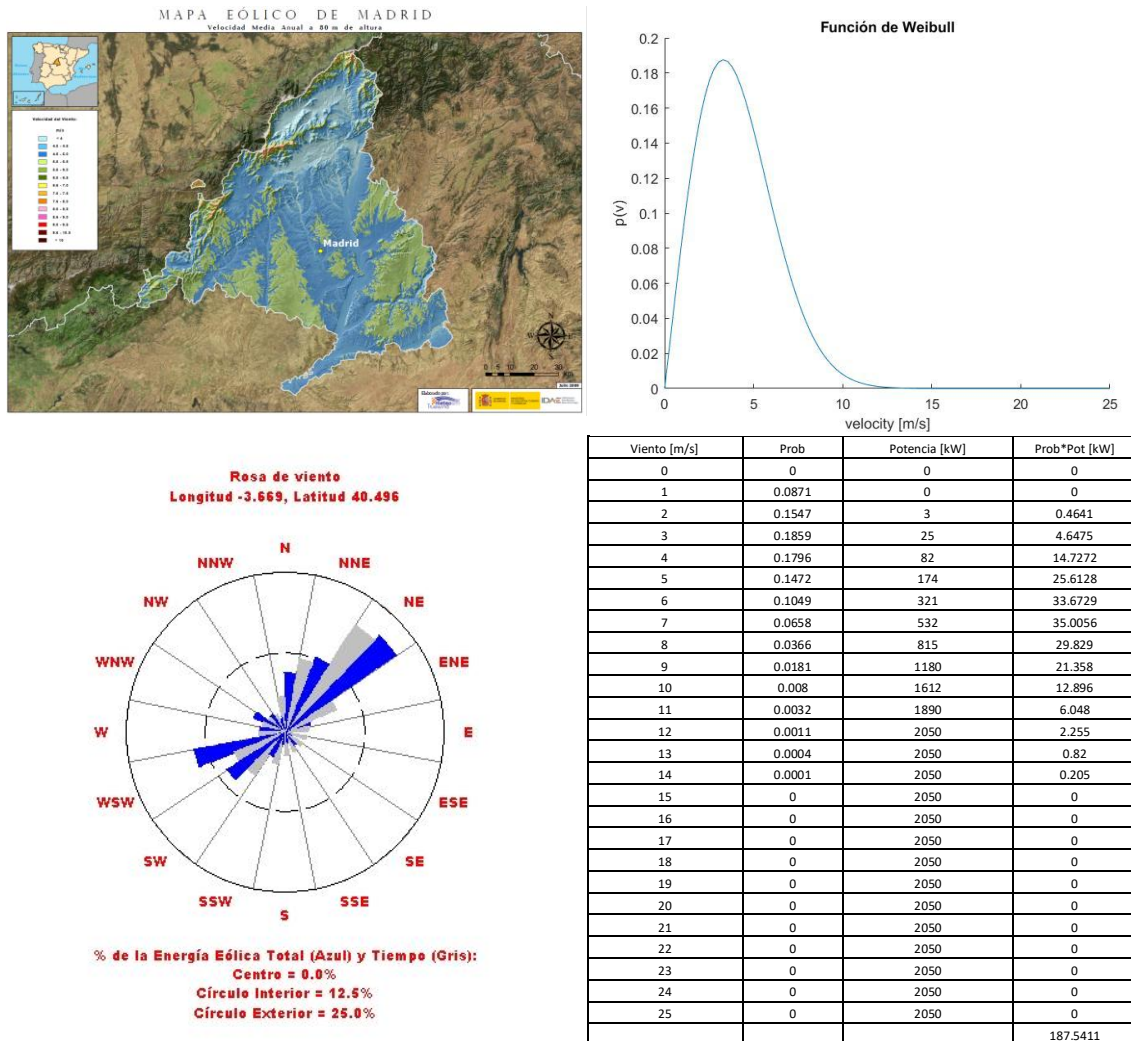


Figura 31. Arriba a la izquierda mapa eólico de Madrid [13], arriba a la derecha función de Weibull de Madrid, abajo a la izquierda rosa de los vientos de Madrid [13] y abajo a la derecha tabla de potencia media que proporciona un aerogenerador en Madrid.



## ESTIMACIÓN DE LA MÁXIMA APORTACIÓN EÓLICA AL CONSUMO ELÉCTRICO EN ESPAÑA

### 15. MELILLA

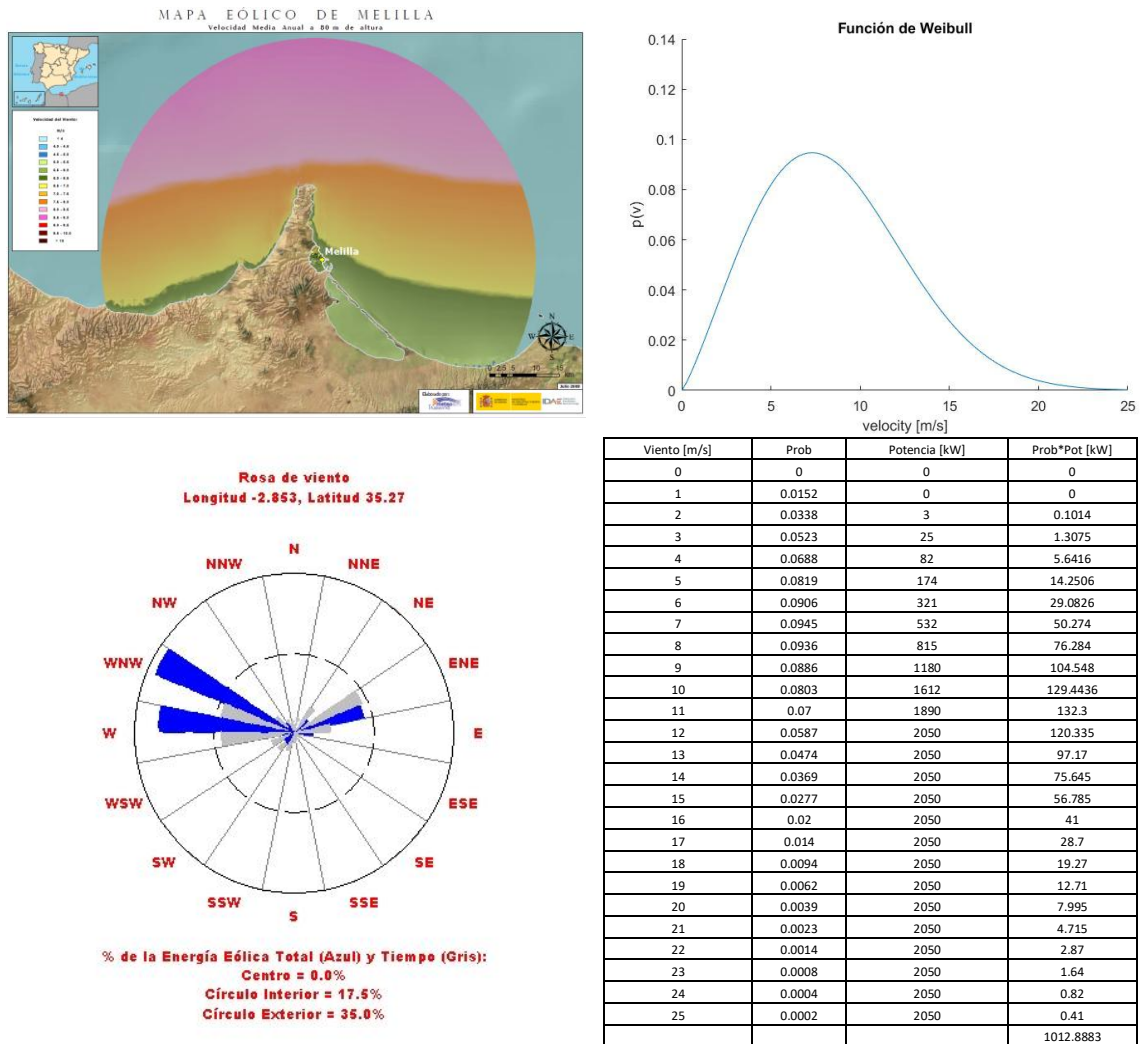


Figura 32. Arriba a la izquierda mapa eólico de Melilla [13], arriba a la derecha función de Weibull de Melilla, abajo a la izquierda rosa de los vientos de Melilla [13] y abajo a la derecha tabla de potencia media que proporciona un aerogenerador en Melilla.



## ESTIMACIÓN DE LA MÁXIMA APORTACIÓN EÓLICA AL CONSUMO ELÉCTRICO EN ESPAÑA

### 16. MURCIA

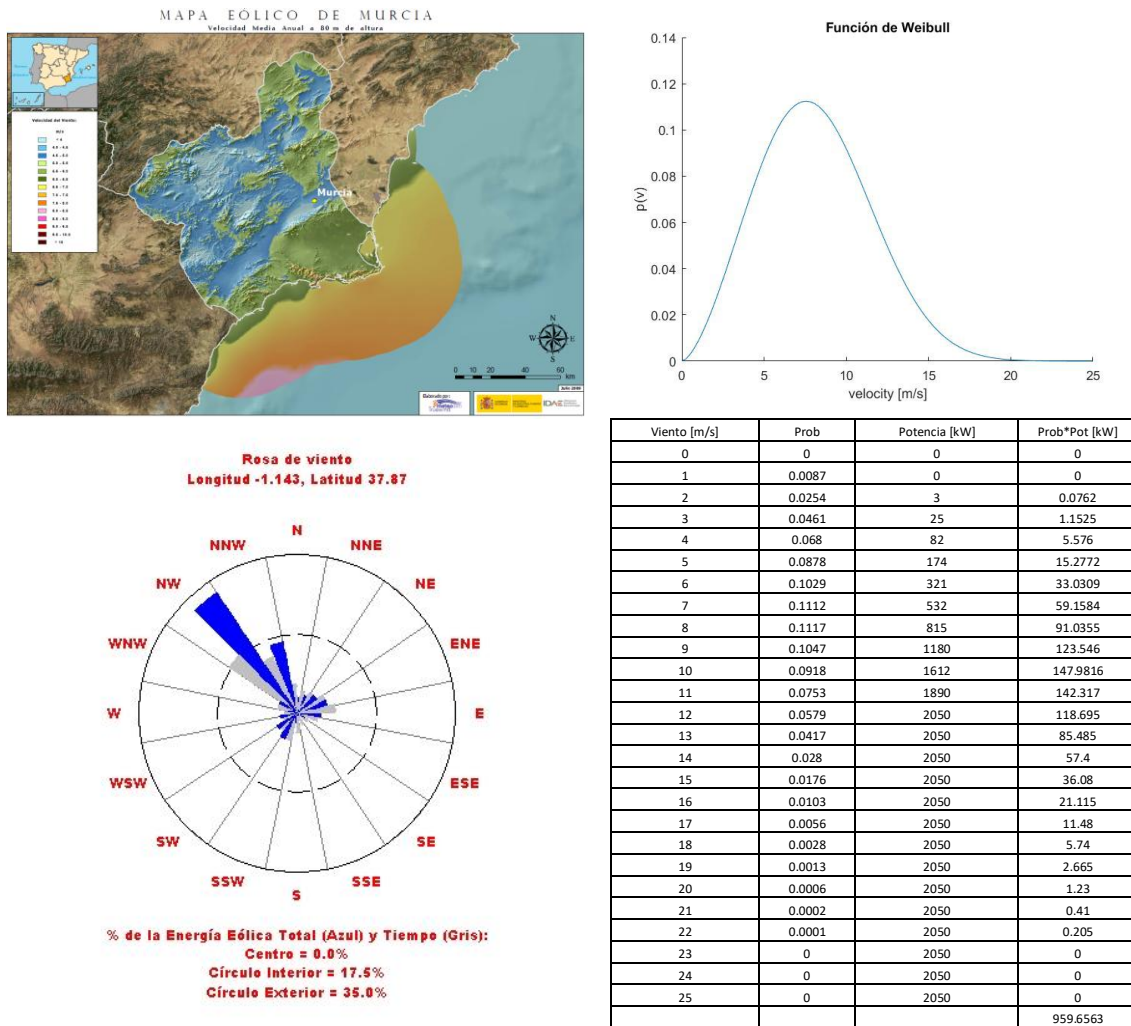


Figura 33. Arriba a la izquierda mapa eólico de Murcia [13], arriba a la derecha función de Weibull de Murcia, abajo a la izquierda rosa de los vientos de Murcia [13] y abajo a la derecha tabla de potencia media que proporciona un aerogenerador en Murcia.



## ESTIMACIÓN DE LA MÁXIMA APORTACIÓN EÓLICA AL CONSUMO ELÉCTRICO EN ESPAÑA

### 17. NAVARRA

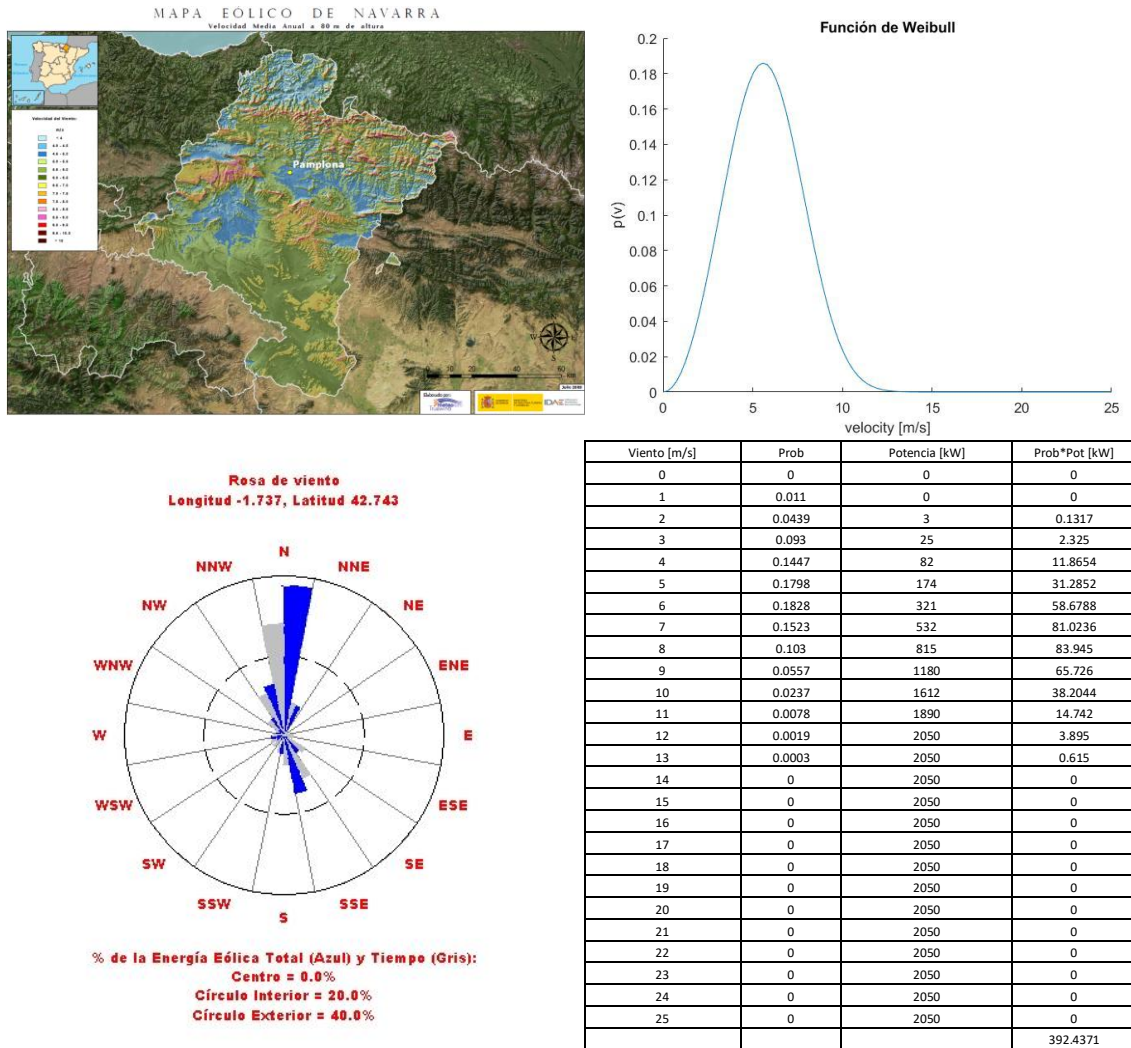


Figura 34. Arriba a la izquierda mapa eólico de Navarra [13], arriba a la derecha función de Weibull de Navarra, abajo a la izquierda rosa de los vientos de Navarra [13] y abajo a la derecha tabla de potencia media que proporciona un aerogenerador en Navarra.



## ESTIMACIÓN DE LA MÁXIMA APORTACIÓN EÓLICA AL CONSUMO ELÉCTRICO EN ESPAÑA

### 18. PAÍS VASCO

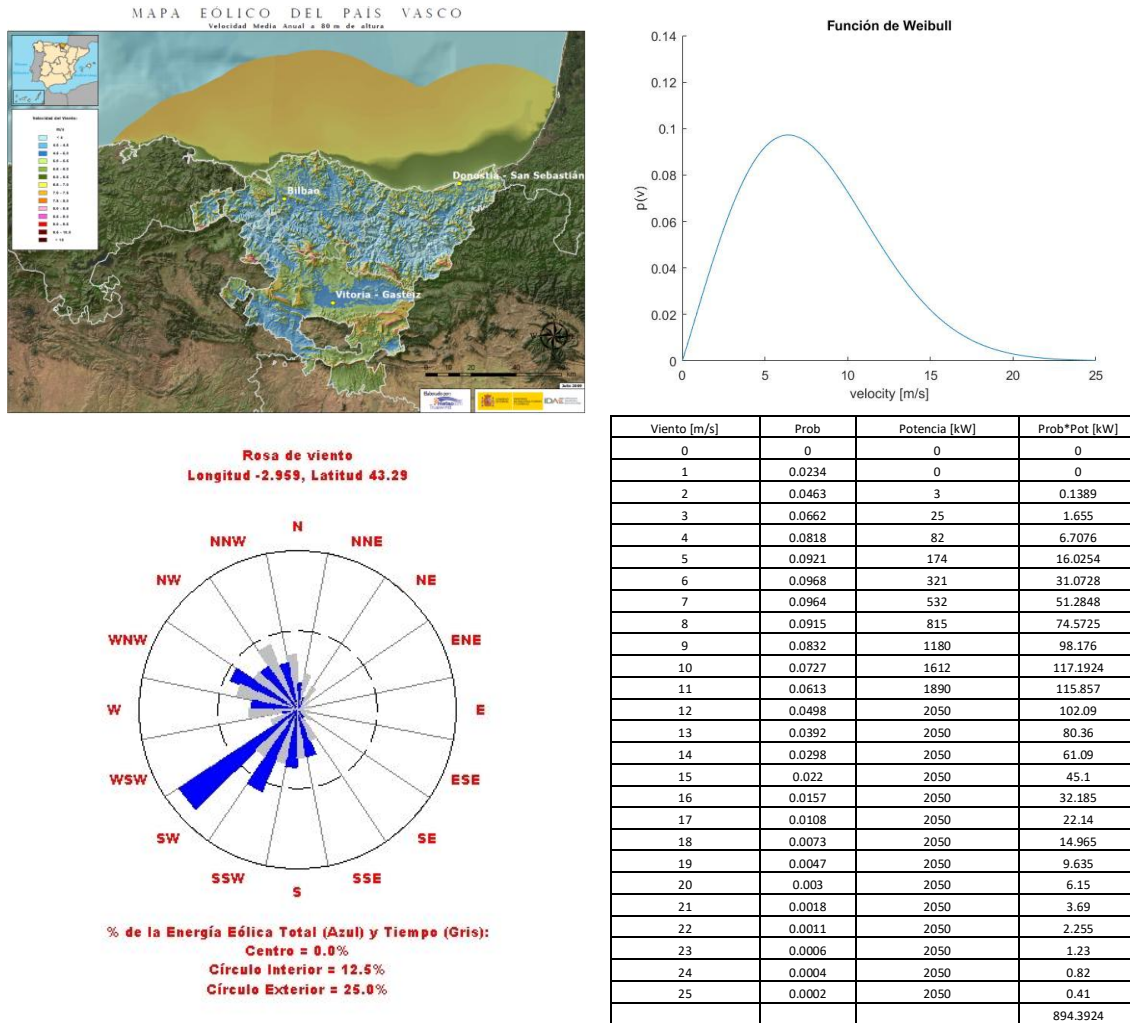


Figura 35. Arriba a la izquierda mapa eólico del País Vasco [13], arriba a la derecha función de Weibull del País Vasco, abajo a la izquierda rosa de los vientos del País Vasco [13] y abajo a la derecha tabla de potencia media que proporciona un aerogenerador en el País Vasco.





## ESTIMACIÓN DE LA MÁXIMA APORTACIÓN EÓLICA AL CONSUMO ELÉCTRICO EN ESPAÑA

### 19. VALENCIA

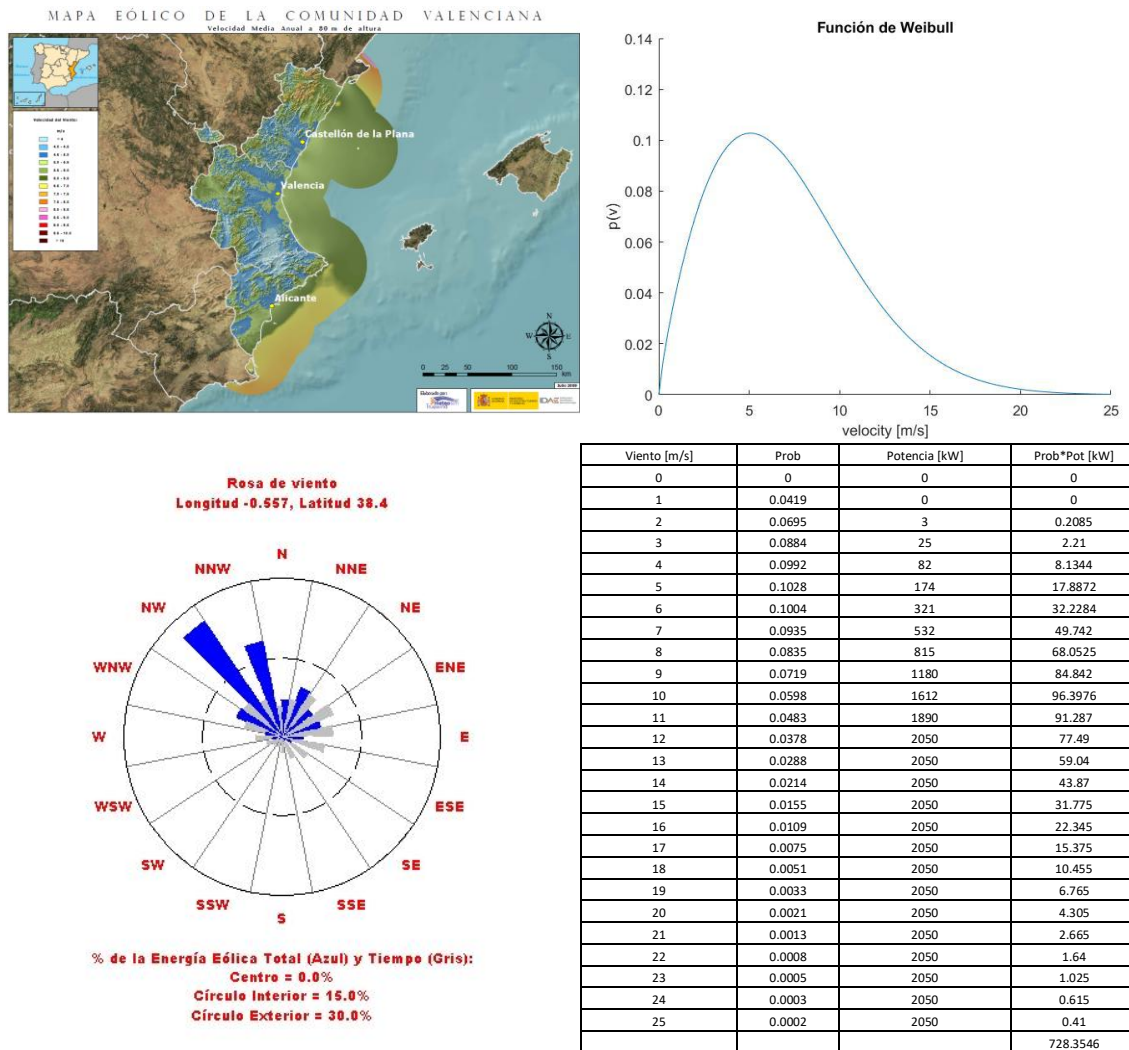


Figura 36. Arriba a la izquierda mapa eólico de Valencia [13], arriba a la derecha función de Weibull de Valencia, abajo a la izquierda rosa de los vientos de Valencia [13] y abajo a la derecha tabla de potencia media que proporciona un aerogenerador en Valencia.